

PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DE MINAS GERAIS
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica

Fernando Basílio Felix

**AVALIAÇÃO DE MINI FRESADORA CNC SEGUNDO CARACTERÍSTICAS
DE MOVIMENTAÇÃO E QUALIDADE DA USINAGEM.**

Belo Horizonte
2013

Fernando Basílio Felix

**AVALIAÇÃO DE MINI FRESADORA CNC SEGUNDO CARACTERÍSTICAS
DE MOVIMENTAÇÃO E QUALIDADE DA USINAGEM.**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, como requisito para obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica.

Orientador: Denilson Laudares Rodrigues

Belo Horizonte
2013

FICHA CATALOGRÁFICA
Elaborada pela Biblioteca da Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais

F316a Felix, Fernando Basílio
Avaliação de mini fresadora CNC segundo características de movimentação e qualidade da usinagem / Fernando Basílio Felix. Belo Horizonte, 2013.
91 f. : il.

Orientador: Denilson Laudares Rodrigues
Dissertação (Mestrado) – Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais.
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica.

1. Máquinas-ferramenta. 2. Fresadoras. 3. Usinagem - Controle de qualidade. I. Rodrigues, Denilson Laudares. II. Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. III. Título.

SIB PUC MINAS

CDU: 621.914

Fernando Basílio Felix

**AVALIAÇÃO DE MINI FRESADORA CNC SEGUNDO CARACTERÍSTICAS
DE MOVIMENTAÇÃO E QUALIDADE DA USINAGEM.**

Dissertação apresentada ao curso de pós-graduação em Engenharia Mecânica, área de Manufatura da Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais.

Dr. Denilson Laudares Rodrigues (Orientador) – PUC Minas

Dr. Gilmar Cordeiro da Silva – PUC Minas

Dr. José Rubens Gonçalves Carneiro – PUC Minas

Belo Horizonte, 28 de junho de 2013

A minha família, namorada e
amigos pelo suporte e incentivo.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por toda força concedida, saúde e sustento para que eu concluísse mais essa etapa.

Gostaria de agradecer ao meu orientador, prof. Dr. Denilson Laudares Rodrigues pelo apoio e orientação.

Agradeço a Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais pelo suporte financeiro oferecido como apoio para o desenvolvimento dessa dissertação.

Agradeço aos técnicos do laboratório de mecânica da PUC- MG unidade Coração Eucarístico e unidade Contagem por todo apoio, ajuda e companheirismo.

Quero agradecer a minha família e namorada por tudo que me ensinaram, por todo amor, apoio constante e incentivo, essas atitudes me sustentaram nesse percurso.

Obrigado a todos.

RESUMO

Hoje existem várias opções destinadas à prototipagem rápida, a variação de preço destas máquinas e dos materiais consumidos por elas variam muito, estes fatores fomentam a necessidade de um julgamento minucioso levando em consideração todos os custos envolvidos na hora de adquirir e operar uma ferramenta desta. Este trabalho tem como objetivo avaliar uma mini fresadora CNC construída no laboratório de robótica da PUC Minas observando características mecânicas como, folga nos eixos e precisão no posicionamento e na qualidade da usinagem como paralelismo e cilindricidade. Uma peça teste com geometria baseada na norma ISO 10791 foi usinada por esta mini fresadora e foram feitas medidas para avaliar seu desvio de forma. De posse dos dados dos testes foi possível inferir sobre o erro de posicionamento, folga e alinhamento dos eixos da máquina ferramenta.

Palavras chave: Usinagem; Máquina ferramenta; Desvio dimensional.

ABSTRACT

Today there are several options for rapid prototyping, the price variation of these machines and materials consumed by them vary greatly, these factors promote the need for a thorough judgment taking into account all costs involved when purchasing and operation this tool. This study aims to evaluate a mini CNC milling machine built in the robotics lab at PUC Minas observing mechanical characteristics as the off-axis and precision in positioning and machining quality as parallelism and roundness. One test piece with geometry based on ISO standard 10791 has been machined for this mini milling and measurements were made to assess their diversion so. Having the test data it was possible to infer the positioning error, backlash and alignment of the axes of the machine tool.

Keywords: Machining; Machine tool; Dimensional deviation.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 - Tipos de superfícies fresadas	36
FIGURA 2 - Configurações e principais componentes de uma fresadora omniversal ..	38
FIGURA 3 - Acessórios de fixação.....	39
FIGURA 4 - Mandril porta pinça e dois modelos de pinças	40
FIGURA 5 - Fresas cilíndricas	40
FIGURA 6 - Peça teste sugerida pela norma ISO 10791-7.....	41
FIGURA 7 - Desvio de forma, paralelismo.....	45
FIGURA 8 - Desvio de forma, cilindricidade	45
FIGURA 9 - Desvio de forma, circularidade.....	46
FIGURA10 - Desvio de forma, perpendicularidade.....	47
FIGURA 11 - Desvio de forma, concentricidade.....	47
FIGURA 12 - Desvio de forma, retidão.....	48
FIGURA 13 - Desvio de forma, inclinação.....	49
FIGURA 14 - Diagrama de blocos da mini CNC.....	57
FIGURA 15 - Desenho da mini CNC.....	57
FIGURA 16 -Tela inicial do Mach 3.....	59
FIGURA 17 - Fluxograma da função de referenciamento.....	60
FIGURA 18 - Fluxograma da função de medição do backlash.....	61
FIGURA 19 - Esquema da ligação dos botões ao PIC.....	62
FIGURA 20 - Fluxograma da supervisão de movimentação.....	64
FIGURA 21 - Tipos de erro no trem de pulso de controle dos motores.....	65
FIGURA 22 - Programação do Labview utilizada para os testes.....	66
FIGURA 23 - Desenho da peça teste utilizada	70
FIGURA 24 - Nomenclatura dos segmentos da peça teste.....	72

FIGURA 25 - Gráfico do teste preliminar de qualidade do trem de pulso.....	74
FIGURA 26 - Gráfico dos dados coletados utilizando gerador de funções.....	75
FIGURA27 - Detalhe Dos carros e guias dos eixos X e Y.....	78

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 - Dados do teste preliminar de qualidade do trem de pulso.....	74
TABELA 2 - Teste de qualidade do trem de pulso para um eixo.....	76
TABELA 3 - Avaliação do backlash no eixo X.....	78
TABELA 4 - Avaliação do backlash no eixo Y.....	79
TABELA 5 - Avaliação do referenciamento do eixo X.....	80
TABELA 6 - Avaliação do referenciamento do eixo Y.....	80
TABELA 7 - Avaliação do referenciamento do eixo Z.....	80
TABELA 8 - Teste posicionamento para eixo X.....	81
TABELA 9 - Teste posicionamento para eixo Y.....	81
TABELA 10 - Teste posicionamento para eixo Z.....	82
TABELA 11 - Teste de qualidade de usinagem.....	84

LISTA DE ABREVIATURAS

APT – Automatically programmed tools

CAD-D - Computer aided design and drafting

CAM - Computer aided manufacturing

CAPP - Computer aided process planning

CN - Controle numérico

CNC - Controle numérico computadorizado

DNC – Distributed numerical control (controle numérico distribuído)

EIAStandards – Eletronics Industires Alliance Standards

ENIAC – Eletrical Numerical Integratorand Calculator

EUA - Estados Unidos da America

FAA - Força Aérea Americana

FTP - File TransferProtocol

ISO - International Organization for Standardization

MIT - Massachusetts institute technology

MMC – Máquina de medição por coordenada

PA - Poliamida

PC - Policarbonato

POM - Poliacetal

PET/PBT - Politereftalato de etileno (polibutileno tereftalato ou Poliésteres termoplásticos)

PPO - Polióxido de fenileno

LISTA DE SIGLAS

a_v	- Avanço por volta
a_z	- Capacidade de remoção de material de cada aresta cortante
cm	- Centímetro
cv	- Cavalo vapor
d	- Diâmetro da ferramenta de corte
l_e	- Comprimento de amostragem
l_m	- Percurso de medição
m	- Metros
min	- Minutos
mm	- Milímetro
n	- Rotação da ferramenta de corte
P	- Potência do motor
$p*b$	- Dimensões da seção de corte
P_m	- Potência do motor de acionamento
P_u	- Potência de usinagem
re	- Resistência de corte do material
RPM	- Rotações por minuto
S	- Desvio padrão
U	- Incerteza padrão combinada
V	- Volume de cavaco removido
V_a	- Velocidade de avanço
V_c	- Velocidade de corte
W	- Watt
$\bar{x}$	- Média aritmética
z	- Número de arestas de corte
α	- Ângulo de incidência
β	- Ângulo de cunha
γ	- Ângulo de saída
σ_r	- Resistência a tração
η	- Rendimento
ν_{ef}	- Número de graus de liberdade efetivos

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	29
1.1. Justificativa	30
1.2. Objetivo geral	30
1.3. Objetivos específicos.....	30
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	31
2.1. História das máquinas ferramentas.....	31
2.1.1. Automação	31
2.1.2. História do controle numérico	32
2.2. Controle numérico.....	33
2.2.1. Conceitos básicos de programação CNC	33
2.3. Fresamento	34
2.3.1. Tipos de fresadoras	34
2.3.2. Operações básicas	35
2.3.3. Principais partes	36
2.3.4. Principais acessórios.....	38
2.3.5. Fresas	40
2.4. Avaliação de máquina ferramenta.....	41
3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	44
3.1. Desvio dimensional e de forma	44
3.1.1. Desvio Dimensional	44
3.1.2. Paralelismo.....	44
3.1.3. Cilindricidade	45
3.1.4. Circularidade	46
3.1.5. Perpendicularidade	46
3.1.6. Concentricidade	47
3.1.7. Retitude.....	48
3.1.8. Inclinação.....	48
3.2. Parâmetros de usinagem.....	49
3.3. Incertezas de medição	51
3.3.1. Incerteza-padrão tipo A	51
3.3.2. Incerteza padrão tipo B.....	52
3.3.3. Incerteza padrão combinada	53
3.3.4. Incerteza expandida	55

4. PLATAFORMA EXPERIMENTAL	56
4.1. Visão geral.....	56
4.2. Software de controle Mach 3.....	58
4.3. Firmware (supervisório)	59
4.3.1. <i>Referenciamento</i>	59
4.3.2. <i>Rotina de identificação de backlash</i>	60
4.3.3. <i>Movimentação off-line</i>	61
4.3.4. <i>Supervisão</i>	63
5. METODOLOGIA	65
5.1. Avaliação da qualidade do trem de pulso	65
5.2. Avaliação de backlash	66
5.3. Avaliação da função de referenciamento	68
5.4. Avaliação de posicionamento	68
5.5. Avaliação do desvio de forma	69
6. RESULTADOS E DISCUSSÕES	73
6.1. Qualidade do trem de pulsos	73
6.1.1. <i>Resultados preliminares</i>	73
6.1.2. <i>Teste completo</i>	75
6.2. Avaliação de backlash	77
6.3. Avaliação da função de referenciamento	79
6.4. Avaliação de posicionamento	81
6.5. Avaliação do desvio de forma	83
7. CONCLUSÕES	87
8. SUGESTÃO DE TRABALHOS FUTUROS	88
REFERÊNCIAS	89

1. INTRODUÇÃO

A convergência de desenvolvimentos tecnológicos nas áreas de materiais, produção e computação aliadas à demanda por meios de produção em baixa escala de componentes para pequenos projetos e protótipos tem incentivado cada vez mais o desenvolvimento de máquinas ferramentas de pequenas dimensões e baixo custo. Hoje pode-se encontrar projetos de máquinas ferramentas CNC na internet capazes de suprir a demanda mencionada acima de forma a ter um crescente número de pessoas construindo tais máquinas para uso próprio e para comercialização mesmo sem ter um levantamento criterioso do desempenho de seu produto.

É possível utilizar polímeros como matéria prima para construção de componentes mecânicos para pequenos sistemas robóticos, sobretudo em projetos acadêmicos. A possibilidade de se construir componentes mecânicos de forma fácil e rápida em um laboratório pode acelerar o desenvolvimento de projetos acadêmicos. Uma opção para a transformação da matéria prima polimérica é a usinagem. Utilizando este tipo de processo de fabricação é possível alcançar boa precisão dimensional e de acabamento com versatilidade o que é importante para a construção de protótipos.

Máquinas ferramentas de pequena capacidade podem realizar trabalhos de usinagem em polímeros sem demandar muito espaço para sua acomodação e a um baixo custo. Hoje a produção destas máquinas CNC de baixa capacidade é facilitada pela quantidade de informação possível de ser encontrada e pelo crescente mercado de componentes e projetos. É possível adquirir softwares capazes de interpretar código G e gerar o comando para drivers de acionamento de motores e também, existe a comercialização destes drivers que já são feitos para serem utilizados com esses softwares.

Apesar das várias facilidades na construção de mini máquinas CNC pouco se fala na avaliação destas. Este trabalho apresentará métodos de avaliar a qualidade da usinagem feita em uma máquina CNC de pequeno porte levando em consideração desde o software de controle passando por questões mecânicas como folga e avaliando por último as peças usinadas em poliacetal medindo o desvio de forma.

1.1. Justificativa

As justificativas para este estudo estão fundamentadas na pouca exploração deste tema em trabalhos acadêmicos e em contra partida as crescentes aparições de projetos amadores sobre este assunto.

1.2. Objetivo geral

Através deste trabalho pretende se apresentar métodos para avaliar a qualidade de trabalho de uma mini máquina de fresagem CNC. Esta avaliação foi feita observando algumas características mecânicas da máquina e também características de suas peças usinadas.

1.3. Objetivos específicos

Os objetivos específicos deste trabalho é avaliar os parâmetros listados abaixo:

- a) Qualidade do trem de pulso responsável pela movimentação dos eixos;
- b) A folga (backlash) de cada eixo;
- c) Desvio ao se posicionar na posição zero (referenciamento);
- d) Erro de posicionamento de cada eixo avaliando sua exatidão e precisão;
- e) Avaliar características geométricas de uma peça teste usinada.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo será apresentado à revisão bibliográfica realizada pelo autor deste trabalho.

2.1. História das máquinas ferramentas

A revolução industrial trouxe a necessidade de se construir, também, máquinas ferramentas capazes de auxiliar na construção dos cilindros, peças fundamentais dos motores a vapor.

No princípio da fabricação dos cilindros a vapor era utilizada a perícia de funileiros para conformar esses componentes. Isso se mostrou uma experiência frustrante já que a falta de concordância da forma do cilindro e do pistão fazia a máquina extremamente ineficiente. A solução para esse problema veio da reunião do escocês James Watt com o mestre ferreiro John Wilkinson por volta do ano de 1775 com a finalidade de construir uma máquina onde era fixada a parede externa do cilindro, e uma barra rígida estendia-se na longitudinal da peça, em um cabeçote de furação uma ferramenta muito simples desliza pela barra, removendo o metal e assim se produzia um furo de razoável precisão de forma.

Com isso surgiu o que muitos veem como uma época de ouro onde o gênio inventivo dos engenheiros europeus e americanos satisfazia as necessidades emergentes das novas indústrias. Esses desenvolvimentos resultaram em uma grande eficiência em termos do uso do trabalho humano.

2.1.1. Automação

Para melhorar a produtividade e a qualidade dos componentes feitos pelas máquinas ferramentas o próximo passo dado foi à automação destas máquinas.

No início dos anos de 1700, existiam máquinas de tricotar controladas por cartões perfurados onde existiam vários cartões que eram lidos de forma sincronizada. Cada furo era responsável pelo acionamento de uma agulha tornando uma solução com grande potencial, mas que ainda apresentava baixa produção. O cartão de controle foi aperfeiçoado em 1807 onde então foi aumentada a produtividade diminuindo o custo por unidade o que levou esse conceito ser usado até os dias de hoje.

A próxima ferramenta a ser usada na automação das máquinas começou a tomar forma no final de 1800 quando Charles Babage (o pai dos computadores) projetou o

primeiro computador digital sofisticado. Esse desenvolvimento continuou com o desenvolvimento do ENIAC (Electrical Numerical Integrator and Calculator) na Moore School for Electrical Engineering da Universidade da Pensilvânia em 1943 e também com Herman Hollerith desenvolvendo um sistema de armazenamento de dados para cartões perfurados. Por fim durante a segunda guerra mundial, John Von Neumann projetou o computador de programas armazenados digitalmente o qual se tornou uma peça essencial para o comércio e indústria complexa.

2.1.2. História do controle numérico

Após a revolução industrial onde foram encontrados meios para reduzir o esforço físico exigido para se desenvolver o processo industrial e o advento dos computadores utilizados para fácil acumulação, armazenagem, e processamento de dados veio a idéia de se juntar esses dois desenvolvimentos.

Em 1912 foi solicitada a patente de uma máquina de cortar algodão que tinha como objetivo "prover os meios para controlar movimento em qualquer direção ou espaço em um ou vários planos para movimentos angulares por meio de uma gravação preparada previamente em uma folha perfurada de papel ou outro material". A Parsons Corporation começou a fazer experimentos no ano de 1947 controlando uma máquina de usinagem convencional com um computador alimentado por cartões perfurados de forma rudimentar, mas que chamou a atenção da força aérea americana. A força aérea Americana patrocinou os estudos da Parsons em desenvolver o controle numérico de uma máquina ferramenta convencional da Cincinnati deste modo criaram o protótipo de uma máquina CN que foi demonstrado em 1953 na Massachusetts Institute of Technology. A aplicação destes estudos surtiu uma mudança revolucionária nas indústrias de transformação.

O interesse e patrocínio dado pela força aérea americana propiciaram um grande desenvolvimento de máquinas CN e uma vasta gama de meios de armazenamento de dados como fita magnética, cartão perfurado, fita perfurada, e mais atualmente disquetes e sistemas de dados centralizados.

2.2. Controle numérico

Controle numérico (CN) é responsável pela interpretação de um código alfa numérico enviado a máquina contendo instruções diretas e gerar os sinais de saída para o controle dos componentes da máquina.

O primeiro protótipo de controle numérico foi desenvolvido no MIT (Massachusetts Institute of Technology) controlando uma fresadora vertical copiadora, retrabalhada via “retrofitting” com servomotores, utilizada no fresamento frontal de alumínio. A entrada de dados era feita através de fita perfurada e resultava na fabricação de peças com boa repetibilidade e precisão sem precisar da intervenção do operador. Devido ao sucesso deste protótipo começaram a ser produzidas máquinas CN e incentivou a evolução delas para as máquinas CNC (controle numérico computadorizado) que possuíam ainda mais flexibilidade, precisão e versatilidade.

O CNC evoluiu do CN e tem como principal avanço a substituição do controle por hardware pelo controle por software. O CNC utiliza um microcomputador como parte integrante do equipamento e esse microcomputador é responsável por controlar a máquina. O programa que alimentará a máquina pode ser preparado remotamente em sistema integrados de projeto (CAD-D) e fabricação (CAM) podendo, também, ser feitas simulações para solucionar possíveis problemas durante a usinagem.

Existem alguns parâmetros inerentes a cada modelo de máquina que define a qualidade do seu trabalho. Alguns desses parâmetros é a precisão de posicionamento, repetibilidade e resolução.

- a) Precisão de posicionamento é o erro entre a posição desejada e a posição real.
- b) Repetibilidade é o erro de posicionamento após repetidos movimentos.
- c) Resolução é o menor incremento de movimento que pode ser obtido.

Para maximizar a precisão das máquinas ferramentas a rigidez e a folga devem ser controladas utilizando estruturas bastante rígidas e eliminando as folgas nos fusos com o uso de esferas recirculantes.

2.2.1. Conceitos básicos de programação CNC

A programação CNC é a preparação dos dados através de um dispositivo de armazenamento de dados. Esses dados dizem à máquina qual deve ser o movimento de seus componentes como ferramentas e outros dispositivos da máquina para produzir a

peça. De um modo amplo a programação CNC tem início quando as características da peça são analisadas para determinar os processos de fabricação necessários levando em consideração como fixar a peça, as ferramentas, sequências de usinagem, e as condições de usinagem. Deve-se levar em consideração, também, o tipo da máquina, as ferramentas disponíveis e ainda todos os fundamentos de usinagem necessários para obtenção do produto com as características desejadas.

Os métodos de programação CNC podem ser classificados em quatro grupos:

- a) Programação manual.
- b) Programação do tipo APT (Automatically programmed tools).
- c) Sistemas Gráfico-interativos.
- d) Sistemas CAD-CAM.

2.3. Fresamento

No início do século 20 surgiu a fresadora cuja característica básica é a usinagem de peças prismáticas, se diferenciando assim do torneamento que trabalha principalmente peças rotacionais (perfil de revolução). No processo de fresamento a ferramenta apresenta o movimento rotacional enquanto o material a ser usinado movimenta em um ou mais eixos rotacionais ou lineares da máquina.

2.3.1. Tipos de fresadoras

Podem se classificar as fresadoras de diversas formas, sendo as principais classificações que levam em consideração o tipo de avanço, a estrutura, a posição do eixo-árvore em relação à mesa de trabalho e a sua aplicação. Tem-se:

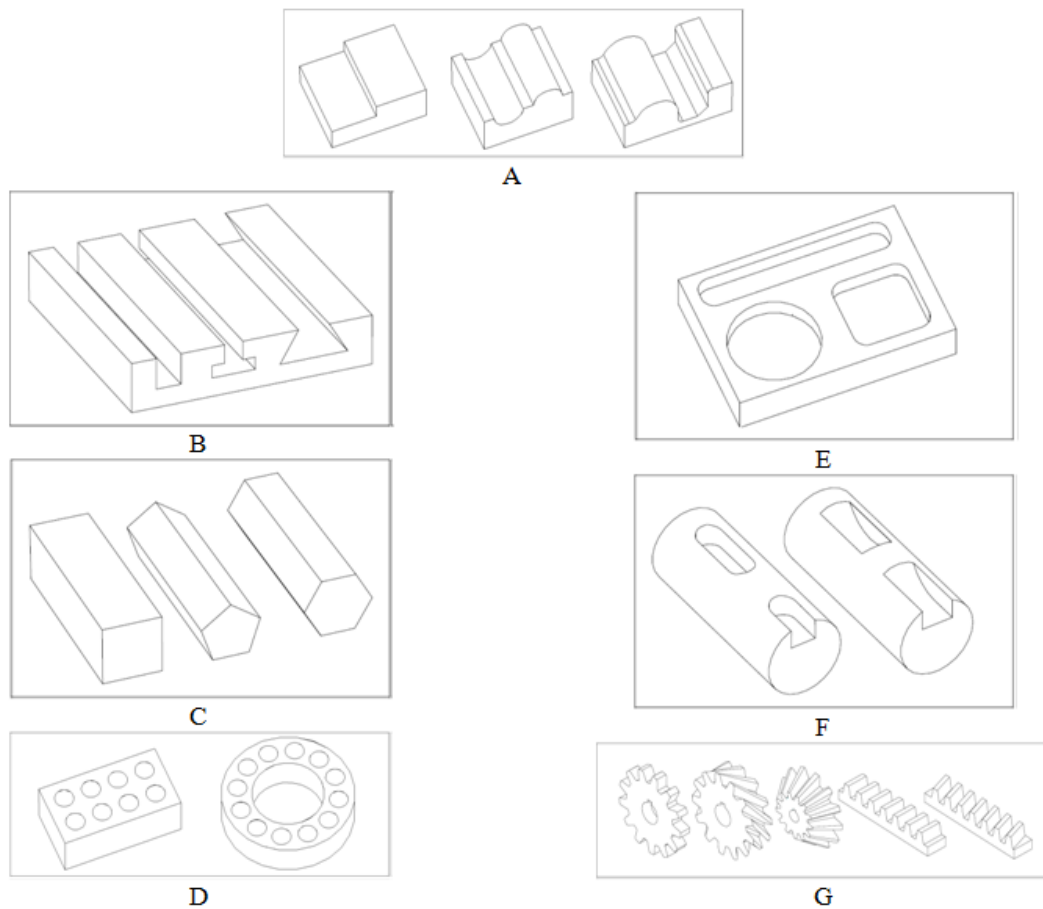
- a) Quanto ao avanço:
 - Manual;
 - Automático (hidráulico ou elétrico);
- b) Quanto à estrutura:
 - De oficina, também chamada de ferramenteira (maior flexibilidade);
 - De produção (maior produtividade);
- c) Quanto à posição do eixo-árvore:
 - Vertical (eixo árvore perpendicular à mesa);
 - Horizontal (eixo árvore paralelo à mesa);

- Universal (pode ser configurada para vertical ou horizontal);
 - Omniversal (universal com a mesa que pode ser inclinada);
 - Duplex (dois eixos-árvore simultâneos);
 - Triplex;
 - Multiplex;
 - Especiais;
- d) Quanto à aplicação:
- Convencional;
 - Pantográfica (fresadora gravadora);
 - Chaveteira (específica para fazer chavetas internas e/ou externas);
 - Dentadora (específica para usinar engrenagens);
 - Copiadora (o apalpador toca um modelo e a ferramenta o reproduz na peça).

2.3.2. Operações básicas

Dependendo de sua configuração as fresadoras podem executar diferentes tipos de trabalhos como pode ser visto abaixo:

- a) Superfícies planas, planas inclinadas, curvas e irregulares (Figura1-A);
- b) Canais simples, em T, cauda de andorinha (Figura1-B);
- c) Eixos com seção regular (Figura1-C);
- d) Furos (Figura1-D);
- e) Cavidades poligonais e circulares (Figura1-E);
- f) Rasgos de chaveta (Figura1-F);
- g) Engrenagens e cremalheiras (Figura1-G).

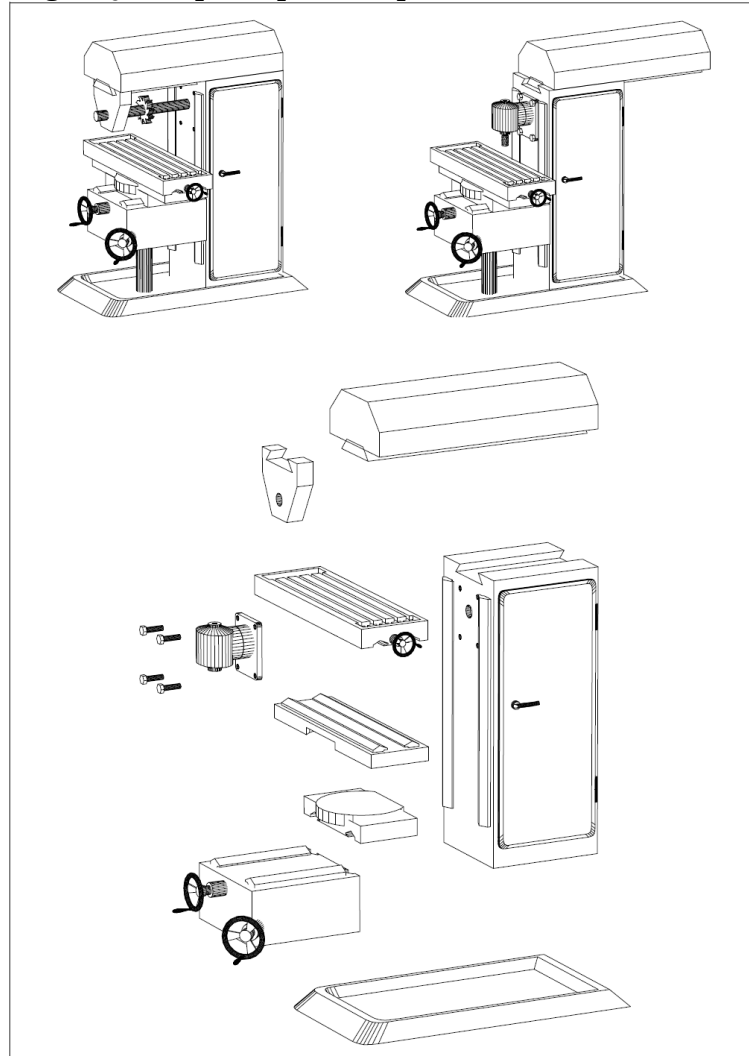
Figura 1: Tipos de superfícies fresadas.**Fonte: Gorgulho, 2009.****2.3.3. Principais partes**

Por existirem diversos modelos de fresadoras, as partes principais de uma destas máquinas podem variar de uma configuração para outra, mas de um modo geral, sua construção é composta pelos seguintes componentes representados na Figura 2:

- a) Base: É o componente responsável por suportar toda a máquina e, muitas vezes, funciona também como reservatório de fluido refrigerante. Normalmente os apoios possuem ajustes para nivelamento da máquina no piso.
- b) Coluna: É a estrutura principal da máquina. Costuma ser o alojamento do sistema de acionamento e também dos motores. Possui as guias (barramento) do movimento vertical.

- c) Console: Desliza pelas guias da coluna, realizando o movimento vertical da peça. Aloja os mecanismos de acionamento da sela e da mesa. Possui as guias do movimento horizontal transversal.
- d) Sela: Na omniversal divide-se em duas partes denominadas sela inferior e sela superior. A sela inferior desliza pelas guias do console, realizando o movimento horizontal transversal. A sela superior gira em um plano horizontal em relação à sela inferior, permitindo-se inclinar a peça. A sela superior possui as guias do movimento horizontal longitudinal.
- e) Mesa: Desliza pelas guias da sela superior realizando o movimento horizontal longitudinal. Possui rasgos em T para fixação das peças e acessórios e canaliza o fluxo de fluido refrigerante de volta ao reservatório.
- f) Torpedo: É a estrutura montada sobre a coluna. Sua finalidade é a de receber o suporte do mandril, quando a fresadora estiver na configuração horizontal e com ferramenta longa. Quando se utiliza a configuração vertical o torpedo é deslizado para trás.
- g) Cabeçote vertical: Dispositivo que fixa na coluna da fresadora e conecta-se ao eixo-árvore, alterando a configuração de horizontal para vertical.
- h) Árvore: É o eixo que recebe a potência do motor e fornece o movimento de giro para a ferramenta. Pode ser acionada através de correia e/ou engrenagens, que permitem o ajuste de algumas velocidades de rotação. Pode girar nos dois sentidos. Normalmente, em sua extremidade, há um cone (ISO ou Morse) para fixação direta de ferramentas ou de mandril porta ferramentas.

Figura 2: Configurações e principais componentes de uma fresadora universal.



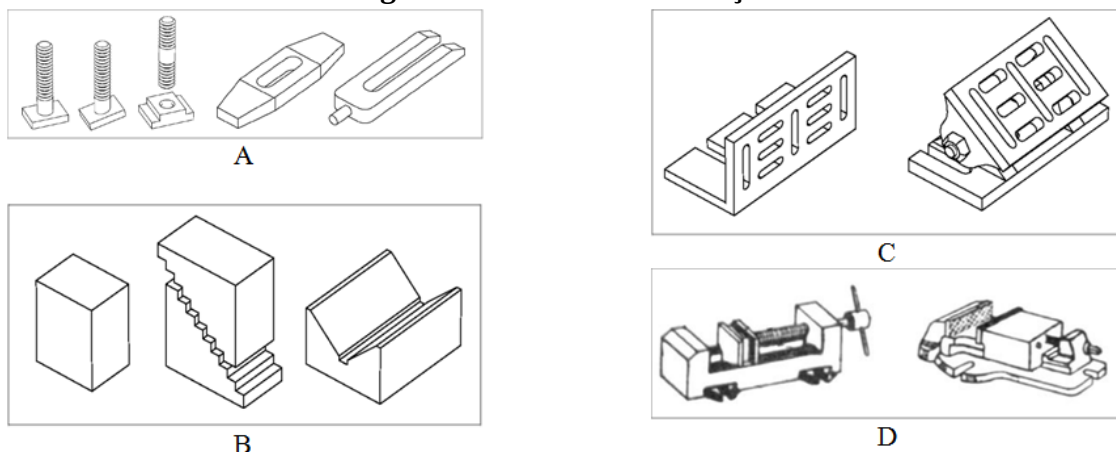
Fonte: Gorgulho, 2009.

A fresadora ferramenteira, normalmente de configuração vertical, não costuma haver o console, pois o movimento vertical é realizado pelo próprio eixo árvore.

2.3.4. Principais acessórios

Os principais acessórios utilizados em operações de fresamento relacionam-se à fixação da peça na mesa de trabalho. São eles:

- a) Parafusos e grampos de fixação (Figura3-A);
- b) Calços (Figura3-B);
- c) Cantoneiras de ângulo fixo ou ajustável (Figura3-C);
- d) Morsas (Figura3-D);

Figura 3: Acessórios de fixação.**Fonte: Gorgulho, 2009.**

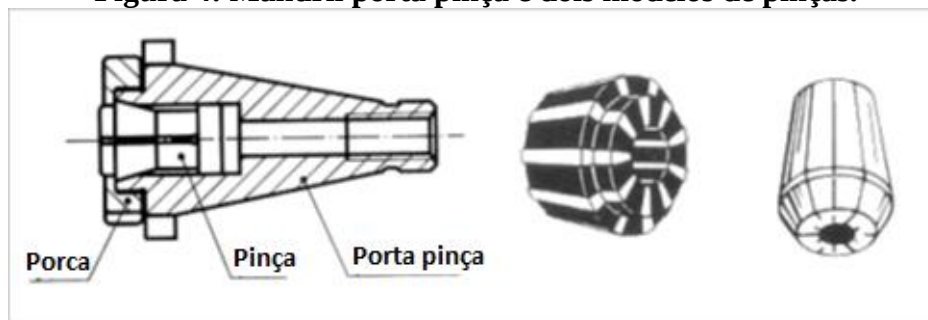
Estes acessórios utilizados para a fixação da peça a ser trabalhada merecem uma atenção especial por poderem influenciar na qualidade da usinagem. Exemplo disto é a morsa que deve ser alinhada corretamente à mesa. É importante verificar se não há cavacos que mantenham a morsa ou a peça ligeiramente inclinada no plano paralelo ao chão.

O conjunto de fixação da ferramenta também deve ter atenção especial. Este conjunto é quase sempre composto pelo eixo arvore que possui em uma de suas extremidades um cone e chavetas onde é fixado um mandril. O mandril a ser utilizado pode ser de três tipos, universal (Jacobs), porta-pinça e porta ferramenta.

O mandril do tipo porta-pinça permite uma força de fixação maior que do tipo Jacobs e também é indicado para ferramentas de haste cilíndrica. A pinça é composta de uma peça única com um furo central no diâmetro da haste a ser fixada com diversos cortes longitudinais que lhe dão uma flexibilidade de fechar este furo em alguns décimos de milímetro.

Este mandril é composto de duas partes. A primeira, que é o mandril propriamente dito, possui uma cavidade que receberá a pinça. Esta cavidade possui uma superfície cônica de igual formato da pinça. A segunda parte é denominada de porca, e é rosqueada no mandril.

A Figura 4 ilustra um mandril porta-pinça e dois modelos de pinça. Durante o rosqueamento, a porca, força a pinça a entrar na cavidade do mandril, e devido à forma cônica obriga a pinça a se fechar e fixar a ferramenta.

Figura 4: Mandril porta pinça e dois modelos de pinças.

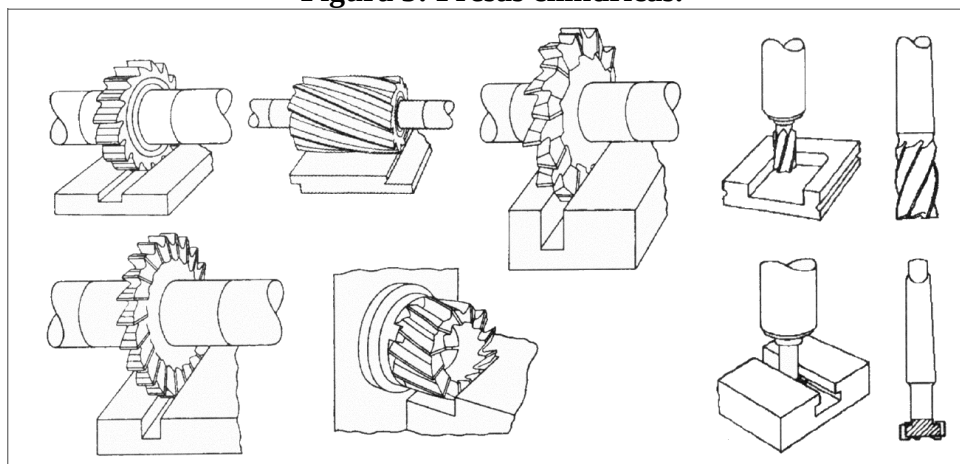
Fonte: Gorgulho, 2009.

2.3.5. Fresas

As fresas são ferramentas rotativas providas de múltiplos gumes de corte dispostos simetricamente ao redor de um eixo. A remoção de material da peça é feita de modo intermitente, o que proporciona um menor desgaste das fresas quando comparadas a outros tipos de ferramentas. Esta vantagem vem pelo fato dos gumes não efetuarem contato com a peça durante todo o tempo e assim eles podem se resfriar mantendo sua dureza.

De acordo com o trabalho podem ser usadas fresas com diferentes números de gumes e distribuições simétricas ou não, sendo as distribuições assimétricas utilizadas para evitar ressonância.

As fresas podem ser classificadas de várias maneiras quanto à forma geral, os dentes, sentido de rotação, construção aplicação, etc. Neste trabalho foram utilizadas fresas cilíndricas que também podem ser chamadas fresas de disco quando são estreitas, ou fresas de topo (lado direito da figura) quando as ferramentas possuem haste própria, como pode ser visto na Figura 5.

Figura 5: Fresas cilíndricas.

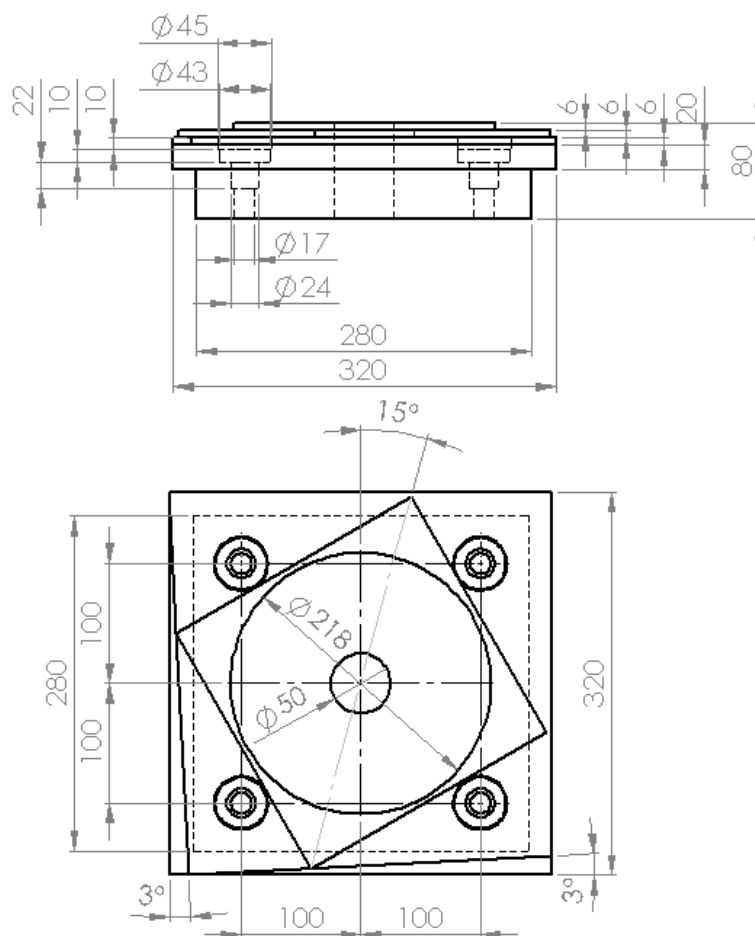
Fonte: Gorgulho, 2009.

2.4. Avaliação de máquina ferramenta

A avaliação de máquinas ferramentas é um tema amplo como pode ser visto nas normas ISO 10791 e ISO 230. Estas normas guiam a execução de vários testes visando analisar desde a construção até o comportamento dinâmico e estático das máquinas ferramentas. Neste trabalho será analisado apenas as características de posicionamento da máquina, onde vigora a norma ISO 230-2 e a avaliação dos desvios de forma das peças usinadas seguindo a norma ISO 10791-7.

A avaliação dos desvios de forma de uma peça teste usinada por uma máquina ferramenta pode servir como parâmetro capaz de dizer a qualidade do trabalho desta máquina (Geldart, 2003; Tapiea, 2007). A norma ISO padroniza a geometria de uma peça teste em duas opções de dimensões (uma delas representada na Figura 6) e as condições em que ela deve ser usinada. Nela também estão os tipos de desvios de forma que devem ser avaliados juntamente com o instrumento de medição e tolerância, como pode ser visto no Quadro 1.

Figura 6: Peça teste sugerida pela norma ISO 10791-7.



Fonte: Norma ISO 10791-1.

Quadro 1: Tipos de medições na peça teste segundo norma ISO 10791-7.

Seguimento da peça	Tolerância		Instrumento de medição
	Medida nominal		
	320	160	
Furo central			
a) Cilindricidade	0,015	0,01	MMC
b) Perpendicularidade entre a linha de centro do furo e a base A	0,015	0,01	MMC
Quadrado			
c) Retitude dos lados	0,015	0,01	MMC ou régua e relógio comparador
d) Perpendicularidade dos lados adjacentes em relação à base B	0,02	0,01	MMC ou esquadro e relógio comparados
e) Paralelismo do lado oposto à base B	0,02	0,01	MMC ou calibrador de altura e relógio comparador
Quadrado inclinado			
f) Retitude dos lados	0,015	0,01	MMC ou régua e relógio comparador
g) Exatidão dos ângulos de 75 em relação à base B	0,02	0,01	MMC ou régua de seno e relógio comparador
Círculo			
h) Circularidade	0,02	0,015	MMC ou relógio comparador ou instrumento de medição de circularidade
i) Concentricidade do círculo externo e o furo central	0,025	0,025	MMC ou relógio comparador ou instrumento de medição de circularidade
Faces inclinadas			
j) Retitude das faces	0,015	0,01	MMC ou régua e relógio comparador
k) Exatidão dos ângulos em relação à base B	0,02	0,01	MMC ou régua de seno e relógio comparador
Furos mandrilados			
n) Posição dos furos com relação ao furo mandrilado C	0,05	0,05	MMC
o) Concentricidade do furo interno com o furo externo D	0,02	0,02	MMC ou relógio comparador ou instrumento de medição de circularidade

Fonte: Norma ISO 10791-1.

Para ser usinada, a peça teste exige da máquina ferramenta uma série de movimentos individuais e combinados dos seus eixos. Os movimentos executados durante a usinagem foram realizados no plano XY com incrementos para a

profundidade de corte no eixo Z. Os elementos a serem usinados consistem em mandrilar cinco furos e uma serie de passadas de acabamento em diferentes perfis, com a intenção de verificar a performance da máquina, sob diferentes condições cinemáticas, isto é, com apenas um avanço de eixo, interpolação linear de dois eixos e interpolação circular.

Pela norma o ensaio deve ser feito utilizando uma das duas opções de peça teste nela descrita. A diferença entre as duas está em suas dimensões mas as duas contém as seguintes características retiradas da norma ISO 10791-7:

- a) Um furo passante mandrilado no centro da peça;
- b) Um quadrado externo e uma base quadrada;
- c) Um quadrado inclinado a 75 graus, sobre a face superior do quadrado;
- d) Um círculo com profundidade de 6 mm na face superior do quadrado inclinado;
- e) Faces inclinadas, no comprimento total de ambos os lados do quadrado externo, com angulo de 3 graus ou que possua uma tangente de 0,05 e uma profundidade de 6 mm no topo dos lados do quadrado externo;
- f) Quatro furos mandrilados a uma distância r do eixo central da peça teste.

3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo foi apresentado conceitos teóricos necessários para o desenvolvimento deste trabalho. Foram apresentados conceitos referentes à medição de desvios de forma como cilíndricidade, perpendicularidade, concentricidade, circularidade, retidão, inclinação e paralelismo. Parâmetros de usinagem como velocidade de corte, velocidade de avanço, resistência de corte do material, potência de usinagem também foram vistos e por fim incertezas nas medições. Os conceitos anteriormente citados foram utilizados para a operação e avaliação da máquina ferramenta utilizada neste trabalho.

3.1. Desvio dimensional e de forma

Sendo uma das características mais importantes em uma máquina ferramenta o desvio de forma, é a diferença entre as dimensões da peça real para as dimensões nominais. As normas que definem os desvios macro geométricos são ABNT NBR 6409, DIN 7184 e ISO R-1101.

3.1.1. *Desvio Dimensional*

O desvio dimensional é a diferença entre a verdadeira dimensão da peça para a dimensão nominal que consta no projeto. Vários fatores como o tipo de máquina ferramenta e parâmetros de fabricação podem influenciar nos desvios.

3.1.2. *Paralelismo*

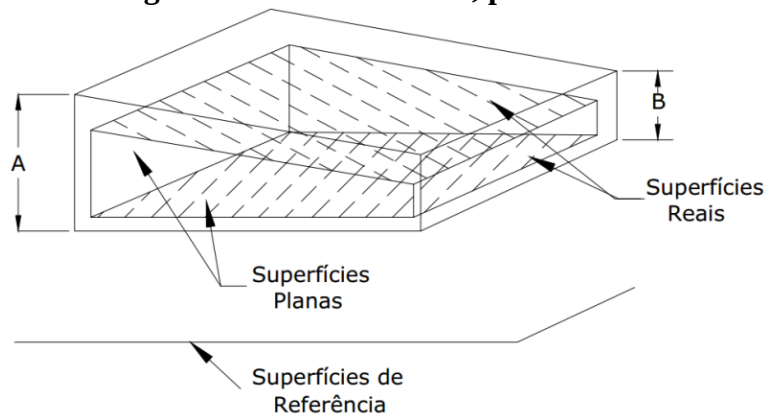
A limitação dos desvios geométricos é importante para garantir, por exemplo, a montagem de um conjunto sem haver interferência entre os componentes (Palma, Ernani Sales, 2006). As possíveis causas dos desvios geométricos são:

- a) Tensões residuais internas;
- b) Falta de rigidez do equipamento e/ou de um dispositivo de usinagem;
- c) Perda de gume cortante de uma ferramenta;
- d) Forças excessivas provocadas pelo processo de fabricação (Ex.: Entre pontas de um torno);
- e) Velocidade de corte não adequada para remoção de material;
- f) Variação de dureza da peça ao longo do plano de usinagem;

g) Suportes não adequados para ferramentas.

Neste trabalho foi avaliado o paralelismo entre dois planos tomando um como referência. Neste caso o paralelismo será a variação da distância em que o plano real está situado do plano de referência como mostrado na Figura 7.

Figura 7: Desvio de forma, paralelismo.

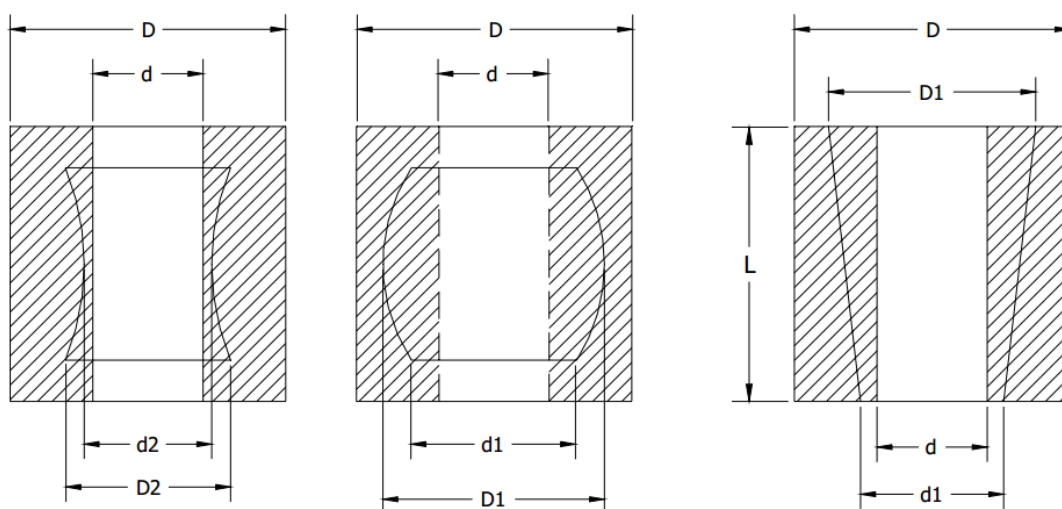


Fonte: Palma, Ernani Sales, 2006.

3.1.3. Cilindricidade

Cilindricidade é a variação que a parede de um cilindro pode ter em sua extensão de referência (Palma, Ernani Sales, 2006). Esse conceito é melhor descrito pela Figura 8 que representa três tipos de desvios de cilindridade que são concavidade, convexidade e conicidade.

Figura 8: Desvio de forma, cilindridade.



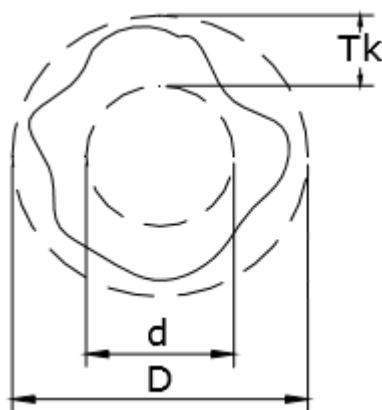
Fonte: Palma, Ernani Sales, 2006.

Na Figura 8 a área hachurada é a tolerância permitida para a parede do cilindro, a linha dentro dessa área é o perfil da parede do cilindro. As dimensões representadas pelas letras podem ser interpretadas sendo D o diâmetro máximo que a parede do cilindro pode chegar e d o diâmetro mínimo, L é o comprimento de referência para a avaliação, $D1$ é o diâmetro máximo real da parede do cilindro e $d1$ é o diâmetro mínimo.

3.1.4. Circularidade

É a diferença entre os diâmetros de dois círculos concêntricos. O perfil real deve situar-se entre os dois círculos (Palma, Ernani Sales, 2006). Na Figura 9 vemos a representação deste tipo de desvio onde T_k é o afastamento entre o círculo de diâmetro “ d ” que é o menor valor de diâmetro admissível para o furo e o círculo maior de diâmetro “ D ” que é o maior valor de diâmetro admissível para o furo.

Figura 9: Desvio de forma, circularidade.

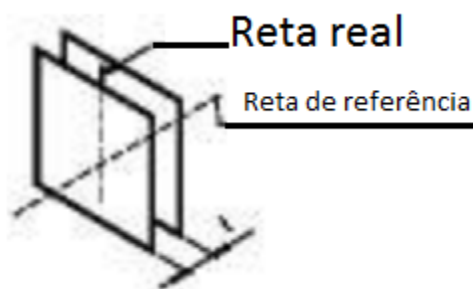


Fonte: Palma, Ernani Sales, 2006.

3.1.5. Perpendicularidade

Perpendicularidade é a condição pela qual o elemento deve estar dentro do desvio angular, tomando como referência o ângulo reto entre uma superfície, ou uma reta, e tendo como elemento de referência uma superfície ou uma reta respectivamente (Pizzolato, Morgana, 2009). Na Figura 10 pode ser visto a representação de uma reta real com a reta de referência.

Figura 10: Desvio de forma, perpendicularidade.



Fonte: Pizzolato, Morgana, 2009.

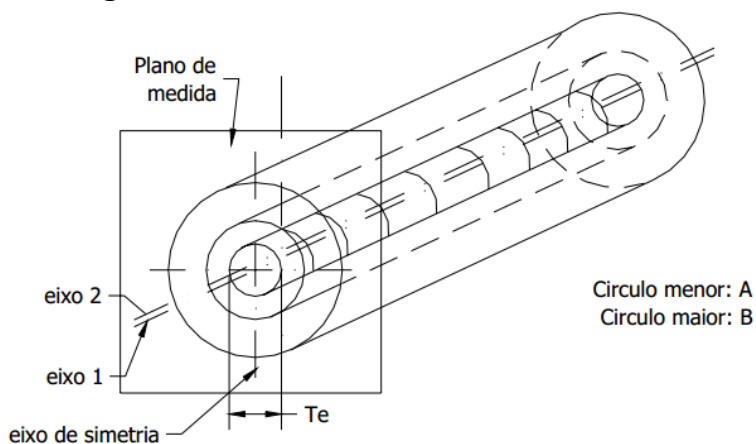
3.1.6. Concentricidade

Segundo Ernani Sales (Palma, Ernani Sales, 2006) concentricidade ocorre quando duas ou mais figuras geométricas regulares, tais como cilindros, cones, esferas ou hexágonos têm um eixo comum. Qualquer variação do eixo de simetria de uma das figuras com relação um ao outro tomado como referência, caracterizará o desvio de concentricidade ou excentricidade.

Tolerância de concentricidade de uma linha de centro com relação à outra tomada como referência: É o diâmetro de um círculo T_e com centro no ponto de referência. A excentricidade deve ser medida em um plano perpendicular à linha de centro de referência como pode ser visto na Figura 11.

O desvio de concentricidade poderá variar de ponto a ponto, quando o plano de medida vai-se deslocando paralelamente a si mesmo e perpendicularmente à linha de centro. Ou seja, o desvio de concentricidade é um caso particular do desvio de coaxialidade.

Figura 11: Desvio de forma, concentricidade.

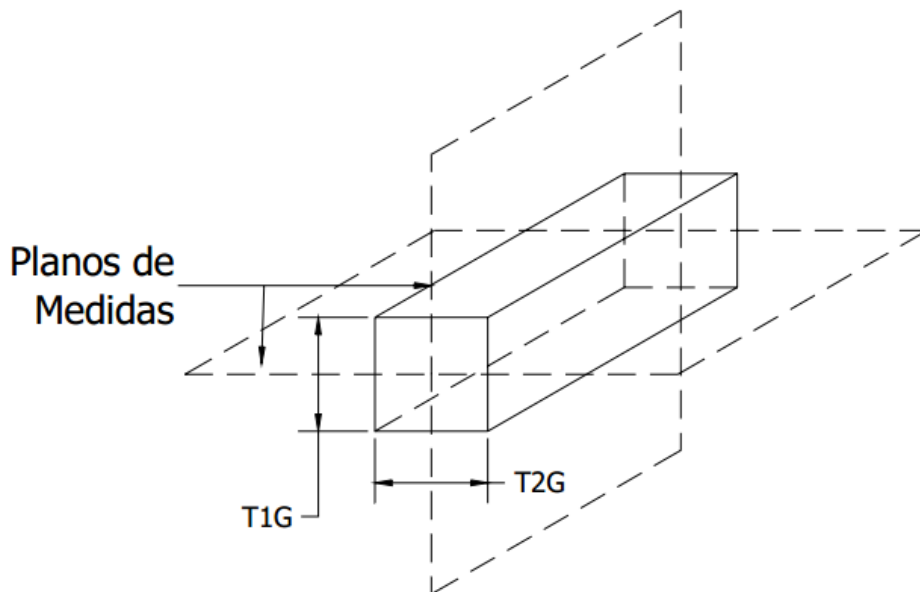


Fonte: Palma, Ernani Sales, 2006.

3.1.7. Retitude

Segundo Ernani Sales (Palma, Ernani Sales, 2006) o campo de tolerâncias para a diferença admissível da reta é definida por um paralelepípedo, cujo corte transversal define as cotas T1G e T2G, de acordo com dois planos perpendiculares entre si. A reta real deverá estar dentro deste paralelepípedo como representado na Figura 12.

Figura 12: Desvio de forma, retidão.



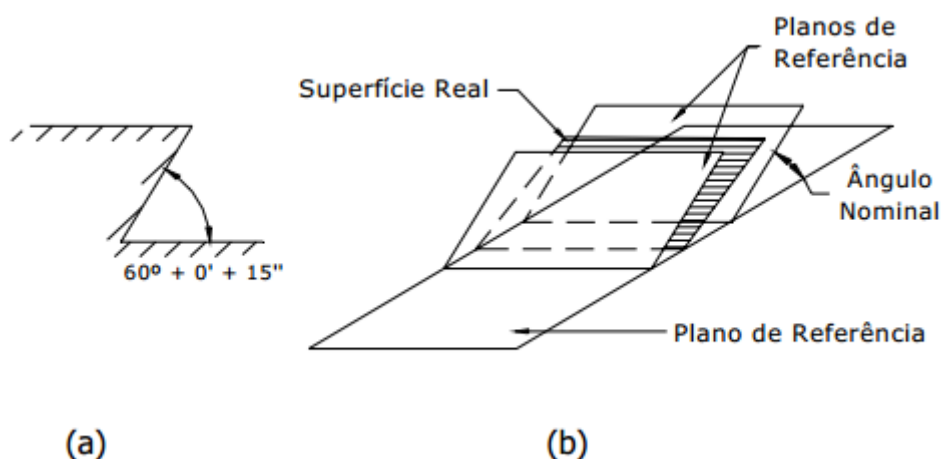
Fonte: Palma, Ernani Sales, 2006.

3.1.8. Inclinação

Ernani Sales (Palma, Ernani Sales, 2006) define inclinação de duas maneiras:

- É a diferença entre o ângulo máximo e o ângulo mínimo, entre os quais se pode localizar as duas superfícies. A tolerância admissível $T\alpha$ é a diferença entre os ângulos como pode ser visto na Figura 13-A.
- É a distância entre dois planos paralelos entre si. A superfície real deve estar situada entre os dois planos paralelos como pode ser visto na Figura 13-B.

Figura 13: Desvio de forma, inclinação.



Fonte: Palma, Ernani Sales, 2006.

3.2. Parâmetros de usinagem

São diversos os parâmetros de usinagem que se deve conhecer na operação de fresamento. Tem-se:

- a) Velocidade de corte - V_c [m/min]

A velocidade de corte depende do material a ser usinado e do material da ferramenta. Este valor normalmente é tabelado pelos fabricantes de ferramentas ou pode ser calculado pela Equação 1.

$$V_c = \frac{\pi * D_{[mm]} * n_{[rpm]}}{1000} \quad (1)$$

- b) Rotação da ferramenta – n [rpm]

A rotação da ferramenta é responsável pela velocidade de corte, e depende também do seu diâmetro (**d**). Tem-se a Equação 2:

$$n_{[rpm]} = \frac{V_c[m/min] * 1000}{\pi * d_{[mm]}} \quad (2)$$

- c) Velocidade de avanço – v_a [mm/min]

Depende da: área de material removido (**A**), resistência específica do material da peça (**re**), potência de usinagem (**Pu**), capacidade de remoção de material de cada aresta cortante (**az**), o número de arestas de corte (**Z**) e também da rotação da ferramenta (**n**). Tendo como referência a potência disponível para a usinagem pode-se calcular a velocidade de avanço máxima suportada pela máquina. Este valor é obtido pela Equação 3:

$$Va_{[mm/min]} = \frac{Pu_{[cv]} * 75 * 1000 * 60}{A_{[mm^2]} * re_{kg/mm^2}} \quad (3)$$

A velocidade de avanço pode ser obtida através de outra característica da ferramenta, que é o *avanço por dente* (az), que mostra qual a quantidade máxima de material que pode ser removida por uma aresta de corte. Por meio deste valor e do número de arestas cortantes da ferramenta (Z) torna-se possível calcular o *avanço por volta* pela Equação 4.

$$a_v_{[mm/volta]} = a_z_{[mm/dente]} * Z \quad (4)$$

Com o valor do avanço por volta, obtido anteriormente, e o valor da rotação da ferramenta pode-se calcular a velocidade de avanço máxima permitida pela ferramenta, tomando como referência a capacidade de remoção do cavaco calculado pela Equação 5.

$$Va_{[mm/min]} = a_v_{[mm/volta]} * n_{[rpm]} \quad (5)$$

d) Resistência de corte do material – $re_{[kg/mm^2]}$

Esta variável também é chamada de pressão específica de corte. Depende da resistência a tração do material, que pode ser facilmente obtida pelo fabricante/fornecedor (tabelas). A Equação 6 é utilizada para obter este valor:

$$re_{[kg/mm^2]} = (3 a 4) * \sigma_r_{[kg/mm^2]} \quad (6)$$

e) Potência de usinagem – $Pu_{[CV]}$

É uma porcentagem da potência do motor de acionamento (Pm). Depende do rendimento do sistema de transmissão da máquina, que por sua vez depende do tipo de transmissão, que pode ser por correia ou por engrenagens. O próprio rendimento do motor também influi no resultado. Pela Equação 7 tem-se:

$$Pu_{[cv]} = Pm_{[cv]} * \eta_{motor} * \eta_{correia} * \eta_{máquina} \quad (7)$$

Para o caso de uma máquina que não utiliza correia, utilizar a relação acima sem sua respectiva componente. A Equação 8 permite realizar a conversão de unidades:

$$P_{[cv]} = P_{[kW]} * 1,36 \quad (8)$$

f) Volume de cavaco removido – V [cm³/min]

Em grandes produções torna-se importante planejar a frequência com que se deve retirar os cavacos da máquina para que não cause acidentes e atrasos na fabricação. Para isto deve se calcular a quantidade de material removida na operação, o que pode ser realizado pela Equação 9:

$$V_{[cm^3/min]} = \frac{p_{[mm]} * b_{[mm]} * v_{a_{[mm/min]}}}{1000} \quad (9)$$

3.3. Incertezas de medição

O VIM (Vocabulário Internacional de Termos Fundamentais e Gerais de Metrologia) conceitua a incerteza como um parâmetro associado ao resultado de uma medição, que caracteriza a dispersão de valores que podem ser fundamentalmente atribuídos ao mensurando. Essa caracterização da incerteza das medições é de extrema importância para se poder avaliar o quão bom são as medidas e por isso deve se levantar quais suas possíveis fontes.

A incerteza do resultado de uma determinada medição geralmente é formada por várias componentes, estas podem ser organizadas de acordo com as características do método utilizado para estimar os valores numéricos. Logo, para que seja estimada a incerteza global, é necessária uma contribuição de cada um dos componentes de incerteza, podendo estes serem estimados a partir dos seguintes termos:

- a) Incerteza padrão (u_i)
- b) Incerteza padrão combinada (u_c)
- c) Incerteza expandida (U)

Primeiramente deve ser calculado a incerteza padrão que é relacionada aos valores de entrada e é obtida através dos conhecimentos sobre as grandezas de entrada que podem influenciar na obtenção da incerteza. Esta pode ser caracterizada em dois tipos:

3.3.1. Incerteza-padrão tipo A

Este tipo de incerteza é avaliada seguindo métodos estatísticos válidos para tratamentos de dados, como o cálculo do desvio padrão da média das observações, utilização do método dos mínimos quadrados, para ajustar aos dados a fim de estimar

parâmetros da curva, seus desvios padrão e análise de variância para quantificar os efeitos aleatórios nas medições. A origem desse tipo de incerteza está nos efeitos aleatórios, nos quais são obtidos a partir de experimentos realizados sob condições de repetibilidade, típicos de uma distribuição gaussiana. Nesse caso, primeiramente, a forma mais indicada de se estimar o valor de uma grandeza X , para n observações independentes e do tipo repetitivas, é a média aritmética, dada pela Equação 10.

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \quad (10)$$

A incerteza padrão Tipo A está relacionada com o desvio padrão experimental, que é obtido a partir da Equação 11.

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1}} \rightarrow s\left(\bar{x} = \frac{s(x_k)}{\sqrt{N}}\right) = u(x_i) \quad (11)$$

Onde $s(x_k)$ é o desvio padrão e N é o número de repetições da medição.

3.3.2. Incerteza padrão tipo B

A avaliação deste tipo de incerteza é efetuada por outros meios que não a análise estatística, devido ao fato de não serem obtidas através de várias observações. É usualmente baseada em julgamentos científicos utilizando todas as informações disponíveis, obtidas a partir de dados de medições anteriores e experiência ou conhecimento geral do comportamento dos instrumentos como:

- a) Dados de medições anteriores;
- b) Especificação do fabricante;
- c) Dados fornecidos do certificado de calibração;
- d) Incertezas fornecidas por referências em manuais ou outros documentos;
- e) Procedimentos operacionais;
- f) Os efeitos das condições ambientais nas informações citadas acima.

Dessa forma, a incerteza tipo B possui algumas distribuições mais frequentes associadas as suas componentes de incerteza. Uma dessas é a distribuição retangular, onde é caracterizada por apresentar a mesma densidade de probabilidade para todos os valores dentro dos limites “ $u - a$ ” e “ $u + a$ ”, e zero fora destes. Seu desvio é dado pela Equação 12.

$$u(x) = \frac{a}{\sqrt{3}} \quad (12)$$

A Distribuição Retangular é aplicada nas seguintes condições:

- a) Quando não se tem informação sobre a natureza do componente;
- b) Para leitura de equipamentos digitais;
- c) Para variações de volume devido à diferença de temperatura;
- d) Para exatidão declarada dos equipamentos;
- e) Vidraria não classe A.

Logo, a distribuição retangular é usada sempre que o experimento apresentar qualquer carência de informação sobre a componente da incerteza que está sendo observado. Por exemplo, as distribuições mais comuns são as resoluções de instrumentos de indicação digital, valores importados de especificações de fabricantes, aritmética de precisão finita.

Outra forma de distribuição que caracteriza a incerteza Tipo B é a distribuição triangular, esta é associada normalmente quando há uma maior probabilidade de ocorrência nas proximidades do valor central. É utilizada quando as informações relacionadas com a grandeza a ser estudada são menos limitadas do que para uma distribuição retangular. Esta é dada pela Equação 13.

$$u(x) = \frac{a}{\sqrt{6}} \quad (13)$$

A distribuição Triangular é aplicada nas seguintes condições:

- a) Vidrarias, equipamentos e instrumentos calibrados;
- b) Leitura em equipamentos analógicos.
- c) Valores próximos de $\bar{x}$ são mais prováveis do que próximos dos limites;

3.3.3. Incerteza padrão combinada

Além de estimar a influência individual de cada fonte de erro sobre o desempenho do processo de medição analisado, é necessário chegar a um único número que estime a incerteza combinada destas várias fontes de erro. Se as várias fontes de erro agem de forma independente, este número não pode ser obtido pela simples soma de cada incerteza. Aspectos estatísticos devem ser levados em conta.

Duas variáveis aleatórias são ditas estatisticamente independentes se suas variações se comportam de forma totalmente desvinculadas, isto é, não há nenhuma relação entre o crescimento de uma e o crescimento (ou decrescimento) da outra. Do ponto de vista estatístico estas variáveis são ditas não correlacionadas, e seu coeficiente de correlação é zero. É a situação mais comumente presente entre as fontes de erro em medições diretas.

Duas variáveis aleatórias são ditas estatisticamente dependentes se suas variações se dão de forma vinculadas, isto é, há uma relação nitidamente definida entre o crescimento de uma e o crescimento da outra de forma proporcional à primeira. Do ponto de vista estatístico estas variáveis são ditas correlacionadas, e seu coeficiente de correlação é unitário e positivo (+1).

Há ainda o caso em que o crescimento da primeira está nitidamente atrelado ao decrescimento proporcional da segunda. Neste caso estas variáveis são ainda ditas correlacionadas, e seu coeficiente de correlação é também unitário, porém negativo (-1). Dificilmente fontes de erros estatisticamente dependentes estão presentes em medições diretas.

Frequentemente na medição direta os efeitos associados às várias fontes de incerteza se manifestam sobre a indicação do sistema de medição de forma aditiva. É como se houvesse uma soma dos efeitos de várias variáveis aleatórias. Assim, neste caso, a incerteza combinada (u_c) da influência das várias fontes de incerteza pode ser estimada a partir das incertezas padronizada de cada fonte de erro pela Equação 14:

$$u_c = \sqrt{u_1^2 + u_2^2 + \dots + u_n^2} \quad (14)$$

É necessário que as incertezas padronizadas de cada fonte de erro sejam expressas na mesma unidade do mensurando.

A expressão 13 só é válida para estimar a incerteza combinada se todas as fontes de incerteza combinarem de forma aditiva, sendo todas mutuamente estatisticamente independentes.

A ação combinada dos efeitos sistemáticos pode ser estimada através da simples adição algébrica da correção atribuída a cada fonte de incertezas. Também neste caso a correção para cada fonte de erro deve estar expressa na mesma unidade do mensurando.

Obtém-se assim a correção combinada (C_c) que, deverá ser considerada para o cálculo do resultado da medição.

3.3.4. Incerteza expandida

A incerteza combinada, estimada através da equação 14, reflete a influência da ação combinada das várias fontes de erros considerados. O valor obtido representa uma faixa de valores em torno do valor médio, dentro do qual, com uma probabilidade estatisticamente definida, espera-se encontrar o erro de medição. Tipicamente u_c corresponde a uma probabilidade de enquadramento em torno de 68% e apresenta distribuição normal.

Na engenharia é comum trabalhar com níveis da confiança de 95%. Para atingir aproximadamente 95%, u_c deve ser multiplicado por um coeficiente numérico denominado de fator de abrangência, calculando-se a denominada incerteza expandida (U) que pode ser calculada pela Equação 15.

$$U = k \times u_c \quad (15)$$

O número de graus de liberdade efetivos (v_{ef}) através da equação de Welch-Satterthwaite (Equação 16):

$$v_{ef} = \frac{u_c^4}{\sum_{i=1}^n \frac{u_i^4}{v_i}} \quad (16)$$

onde:

u_c é a incerteza combinada;

u_i é a incerteza padronizada associada a i-ésima fonte de incerteza;

v_i é o número de graus de liberdade associado a i-ésima fonte de incerteza;

n é o número total de fontes de incertezas analisadas.

O valor de “k” para nível da confiança de 95% pode então ser obtido. Assim, finalmente a incerteza expandida pode ser calculada pela Equação 17.

$$U_{95} = K_{95} \times u_c \quad (17)$$

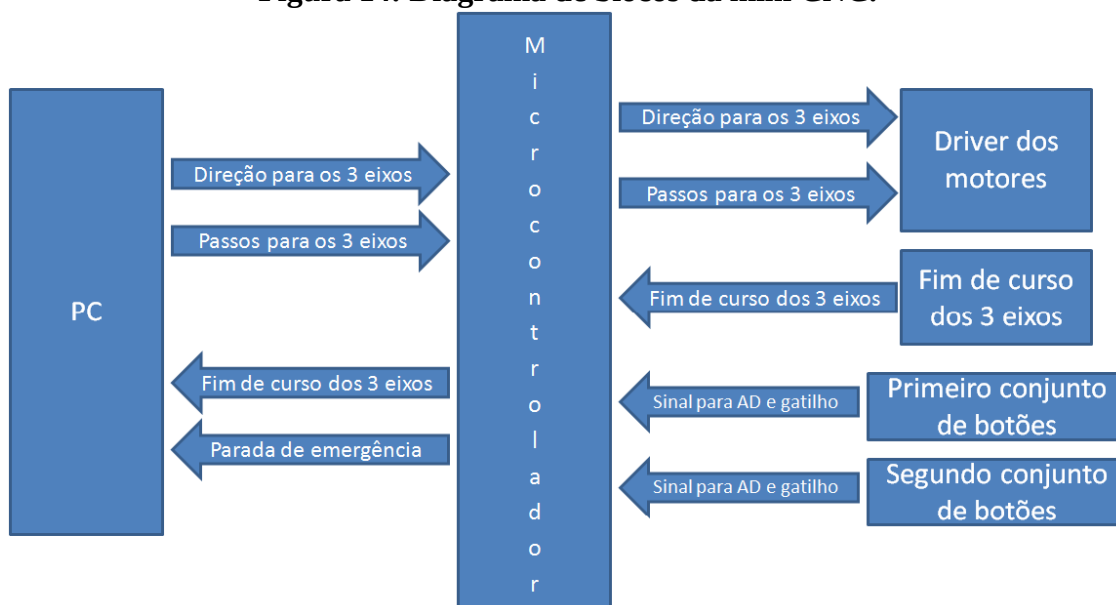
4. PLATAFORMA EXPERIMENTAL

Neste capítulo foi apresentado à plataforma onde foram feitas as avaliações.

4.1. Visão geral

A mini CNC a ser utilizada neste trabalho já foi utilizada como foco de outros trabalhos, mas algumas de suas características como o deslocamento do eixo Z de apenas 50 mm e a falta de estrutura para fixar um motor spindle limitava sua aplicação. Neste trabalho a máquina ferramenta teve sua mecânica atualizada com a intenção de aumentar o curso do eixo Z. Foi colocado um motor spindle de 0,8 CV e implementado um circuito micro controlado responsável por impedir tentativas de se movimentar os carros de cada eixo além das dimensões da máquina e fornecer a utilidade de identificar a folga de cada eixo (backlash). As alterações mecânicas, a montagem dos circuitos eletrônicos e a programação do micro controlador foram realizadas pelo autor deste trabalho e a máquina será utilizada por alunos da PUC Minas no laboratório de robótica.

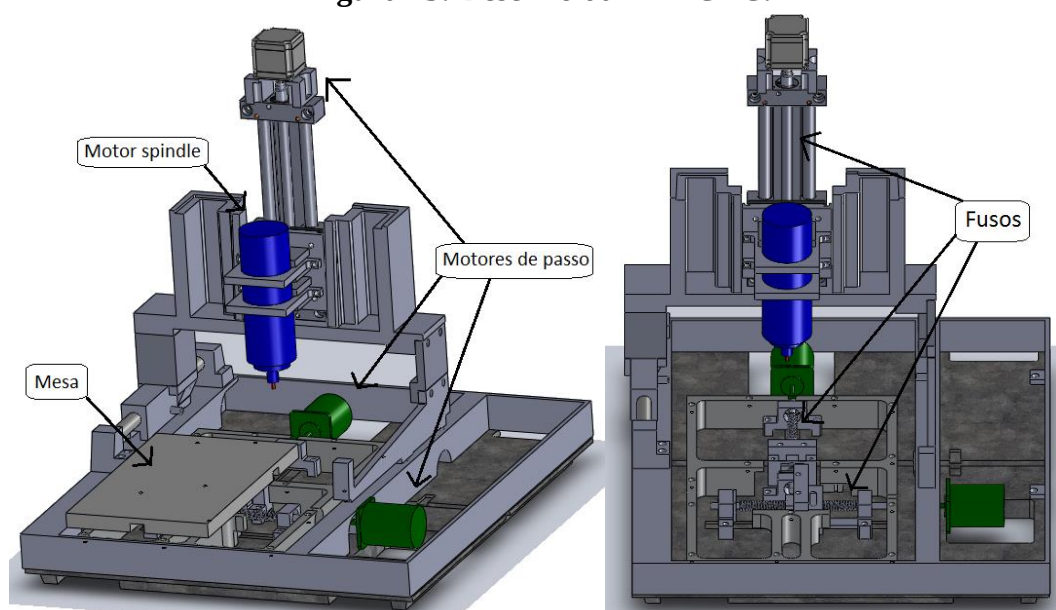
A mini CNC é composta por um computador, micro controlador, driver de acionamento para motores de passo e estrutura mecânica. O computador executa o software de controle, este software interpreta o código G e gera a trajetória que os eixos da máquina devem percorrer e envia os comandos para os motores. Esses comandos passam primeiramente pelo micro controlador que faz a supervisão do estado da mini CNC e decide se a ordem de movimento ordenado pelo computador pode ser passado para os motores. Os motores de passo a serem utilizados são do tipo bipolar e são acionados por um CI Allegro 3984 que recebe os comandos de passo e direção enviados pelo software de controle através da porta paralela do computador. Os sinais de entrada e saída de cada componente podem ser vistos na representação em diagrama de blocos na Figura 14.

Figura 14: Diagrama de blocos da mini CNC.

Fonte: Elaborado pelo autor.

A mini CNC possui três eixos sendo os eixos X e Y responsáveis por movimentar a mesa e o eixo Z responsável pela movimentação da ferramenta de corte.

Os três eixos são movimentados por um sistema de fuso e castanha onde os motores são acoplados ao fuso com um acoplamento flexível sendo que os eixos X, Y e Z têm respectivamente um deslocamento de 100, 90 e 150 mm. O desenho da mini CNC pode ser visto na Figura 15.

Figura 15: Desenho da mini CNC.

Fonte: Elaborado pelo autor.

As ferramentas de corte são presas diretamente ao motor spindle por meio de pinça com porca do modelo ER 11 sendo possível utilizar ferramentas de até sete mm de diâmetro. O motor spindle é da marca Azanelli modelo MAC 65-082201 de 0,8 kW de potência, rotação máxima de 24000 rpm e refrigeração por ventoinha.

Existe um monitoramento constante do uso da mini CNC por um micro controlador do modelo PIC 18F4550 verificando se o limite de deslocamento dos eixos não será excedido. Na programação do PIC existe a quantidade que cada eixo pode se movimentar e cada movimento ordenado pelo computador é observado, se estiver dentro dos limites de deslocamento essa ordem é repassada para os motores, caso contrário o movimento é interrompido. Esse tipo de controle também poderia ser feito pelo próprio software de controle executado no computador, mas seria preciso configurar corretamente este software o que não é possível saber se o usuário fez corretamente.

4.2. Software de controle Mach 3

Mach 3 é um software executado em ambiente Windows e tem como objetivo interpretar código G, gerar trajetória referente ao código e enviar os comandos às placas de potência dos motores de passo. Sua tela de operação pode ser vista na Figura 16 e nela é onde são exibidas as informações do software durante a usinagem.

Este software comunica-se com as placas de acionamento dos motores através da porta paralela do computador. Basicamente ele envia para essas placas comandos informando direção de rotação e um pulso para o passo no caso de ser usado driver para motores como o Allegro 4989 ou 3984. Também pode ser feita a configuração para o software acionar diretamente os transistores sendo necessário configurar qual a ordem de comutação dos pinos necessários para cada passo. Parâmetros como velocidade máxima de cada eixo e aceleração podem ser alterados para a adequação dos vários tipos de motores de passo disponível no mercado.

O Mach 3 também aceita pinos de entradas que podem ser usados como chave fim de curso ou botões de emergência. Esses pinos também são totalmente configuráveis devendo ser respeitado apenas às limitações da própria porta paralela.

Durante a execução da usinagem é mostrado no canto direito superior da tela do software uma representação gráfica da trajetória que a ferramenta executa o que também serve como uma avaliação grosseira do código executado.

Figura 16: Tela inicial do Mach 3.



Fonte: Elaborado pelo autor.

4.3. Firmware (supervisório)

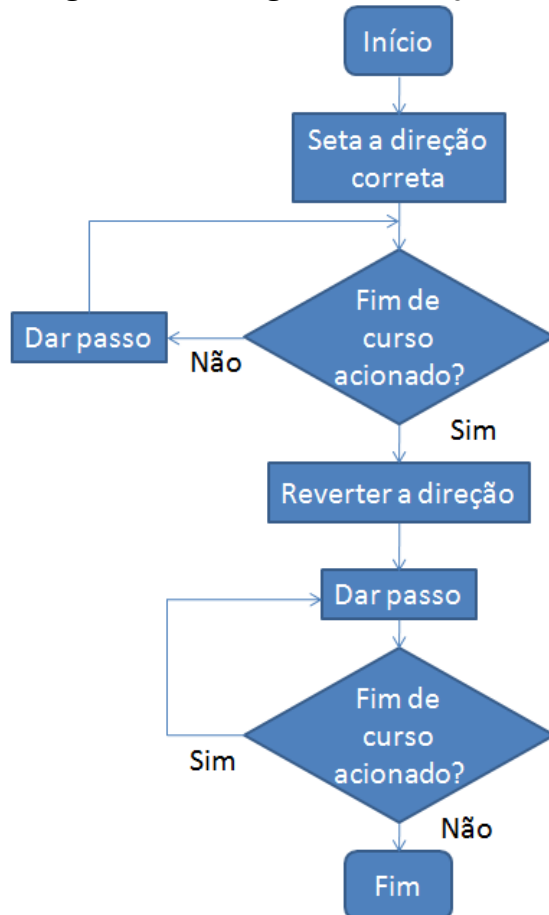
Incorporado a mini CNC existe um micro controlador PIC 18F4550 com rotina para identificação de backlash (folga no engrenamento), movimentação da mesa em modo off-line através de botões dedicados, referenciamento dos eixos e a supervisão do deslocamento dos eixos. Cada uma destas funções estão detalhadas nos itens abaixo.

4.3.1. Referenciamento

O referenciamento da mini CNC é uma operação que leva o carro de cada eixo para a posição zero. Essa operação é necessária para se fazer o monitoramento de posição descrito no item anterior.

Como o controle de posição é feito em malha aberta é necessário saber onde cada carro se encontra antes de começar a operação da mini CNC. Para o referenciamento os três motores são acionados pelo micro controlador em uma direção predefinida até que as chaves fim de curso sejam acionadas. Quando as chaves são acionadas os carros param e inicia-se o movimento na direção inversa e com baixa velocidade até que as chaves de fim de curso não estejam mais acionadas. O fluxograma desta operação pode ser visto na Figura 17.

Essa rotina pode ser acionada a qualquer momento pelo operador através de um botão dedicado a essa operação.

Figura 17: Fluxograma da função de referenciamento.**Fonte: Elaborado pelo autor.****4.3.2. Rotina de identificação de backlash**

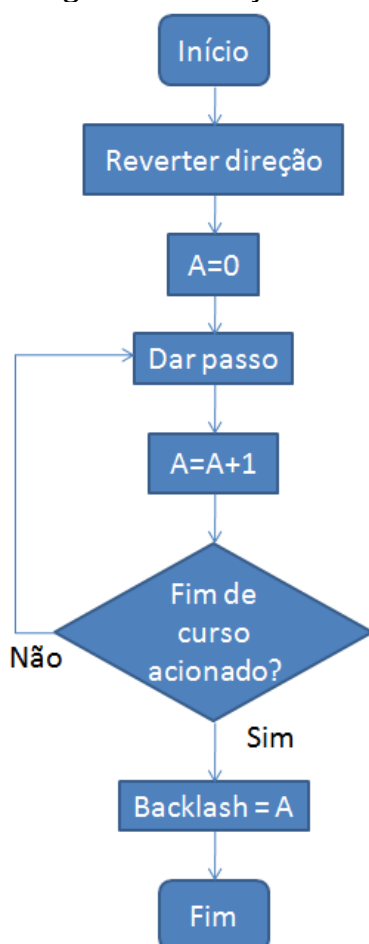
O backlash é a folga do engrenamento entre o fuso e a castanha. Essa folga se não corrigida leva a erros de posicionamento quando acontece inversão do sentido de deslocamento do eixo. Quando acontece a inversão de deslocamento o motor deve dar alguns passos até que o contato entre a castanha e o fuso cesse de uma face do dente do fuso e comece na outra face.

A rotina de identificação de backlash é uma função para facilitar a medição deste parâmetro auxiliando a correta configuração do software Mack3. Essa rotina é executada inteiramente no micro controlador e apresenta o resultado pelo PC.

Para iniciar a identificação primeiramente é feito o referenciamento dos eixos. Com isso a posição do eixo é conhecida e é um passo do motor após deixar de acionar a chave fim de curso, portanto sabe-se a posição em que o carro se encontra da chave fim de curso e qual o sentido de seu ultimo deslocamento. Nestas condições o backlash pode ser medido invertendo o sentido de deslocamento do carro e contando quantos passos o

carro gasta para acionar novamente a chave fim de curso. Se o eixo não apresentar nenhuma folga o motor necessitará dar um passo para que o carro acione a chave fim de curso, qualquer valor maior que um passo é causado pela folga. Esta rotina é repetida cinco vezes e o valor apresentado como o número de passos a ser compensado é a média dessas medições. O fluxograma desta operação pode ser visto na Figura 18.

Figura 18: Fluxograma da função de medição do backlash.



Fonte: Elaborado pelo autor.

O PIC transmite o valor do backlash calculado para o computador através de comunicação serial RS232. No computador estará sendo executado algum software capaz de ler os dados recebidos através da porta serial para ser possível que o usuário leia esta informação.

4.3.3. Movimentação off-line

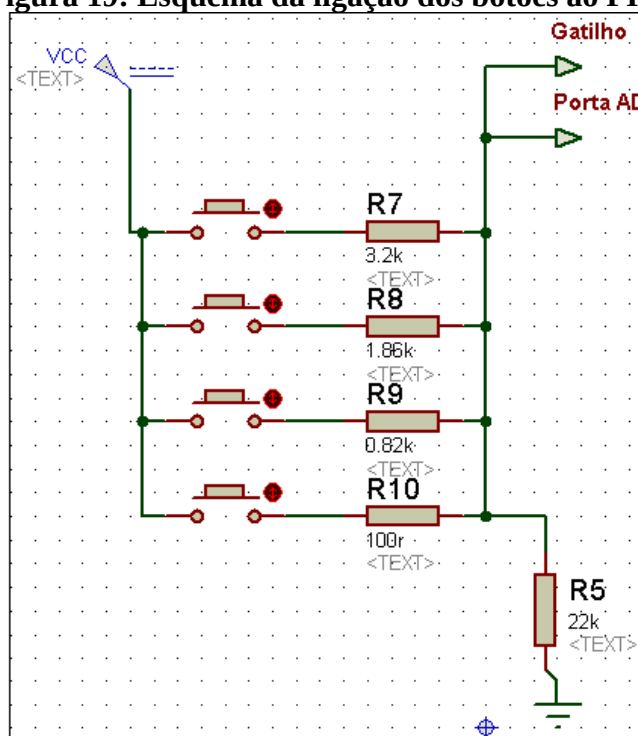
Para facilitar a movimentação dos eixos da mini CNC foi desenvolvido um modo para fazer isso sem a necessidade do software de controle Mach 3 enviar as

ordens. Isso facilita no caso de ter que movimentar algum dos eixos para fazer a fixação da peça ou troca de ferramenta.

O comando da movimentação é feito através de botões dedicados. Estes botões estão ligados a uma porta do PIC e uma rotina dentro do firmware é responsável por verificar o acionamento dos botões. Quando algum botão é acionado ele é identificado e faz com que o PIC execute uma função que envia para a placa de acionamento do motor a informação de direção e o trem de pulsos para os passos.

Para diminuir o número de pinos do PIC necessários para fazer a ligação dos botões foi utilizada uma série de divisores de tensão ligados a uma porta de conversão analógica/digital, o circuito pode ser visto na Figura 19. Cada botão “aciona” um divisor de tensão que levará para a porta do PIC uma tensão conhecida e assim é possível saber qual botão foi acionado. Mais um pino foi usado como indicador de que algum botão foi pressionado pelo fato de ser possível a utilização do pino como conversor analógico/digital e entrada digital simultaneamente.

Figura 19: Esquema da ligação dos botões ao PIC.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Os botões presentes na mini CNC são oito sendo seis de movimentação nos dois sentidos de cada eixo, um para acionar a função de referenciamento e mais um para sair da interrupção por exceder o limite de deslocamento de algum eixo. Os botões foram

agrupados em grupos de quatro e cada grupo é ligado a um pino de gatilho para iniciar a conversão AD e ao pino da porta AD propriamente dito.

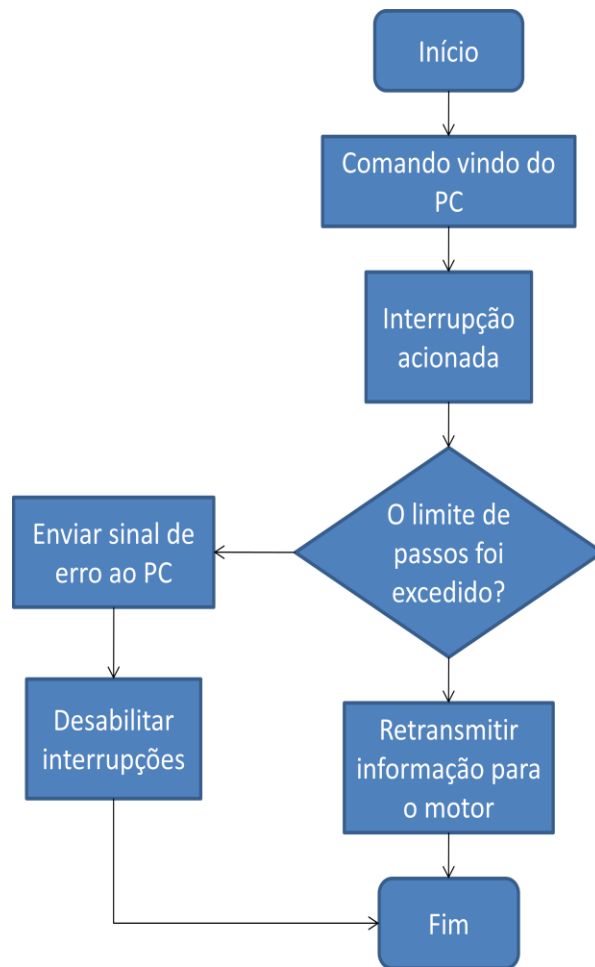
A utilização desta função para fazer trabalhos simples como um faceamento é possível, mas mostra alguns problemas como a falta de dados sobre a posição, falta de variação na velocidade de deslocamento e ajustes finos no posicionamento.

4.3.4. Supervisão

Para evitar que os limites de deslocamento dos eixos da mini CNC sejam excedidos os comandos vindos do computador são monitorados. Esse monitoramento é feito pelo micro controlador da mini CNC que tem em seu firmware o número máximo de passos que o motor de cada eixo pode dar e caso esse número seja excedido o micro controlador interrompe a movimentação e informa para o computador que um erro foi cometido.

Para o micro controlador ter a capacidade de interromper os comandos vindos do computador estes são enviados diretamente ao PIC que repete o comando para as placas de potência dos motores. Os comandos gerados pelo Mach 3 vão para o micro controlador através da porta paralela do computador em pinos configuráveis no software. Os pinos da porta paralela referentes ao passo dos motores são conectados aos pinos do PIC configurados para efetuar uma interrupção por hardware, dentro desta interrupção do fluxo normal do firmware estão os comandos para enviar o pulso para as placas de potência do motor e o passo a ser dado. Deste modo quando for necessário interromper os comandos vindos do computador basta desabilitar a interrupção por hardware. Essa ação de desabilitar a interrupção pode ser feita através de comandos no firmware do PIC e isso é o que acontece quando o PIC observa que algum eixo está dando mais passos do que é possível. O fluxograma desta operação pode ser visto na Figura 20.

Figura 20: Fluxograma da supervisão de movimentação.



Fonte: Elaborado pelo autor.

5. METODOLOGIA

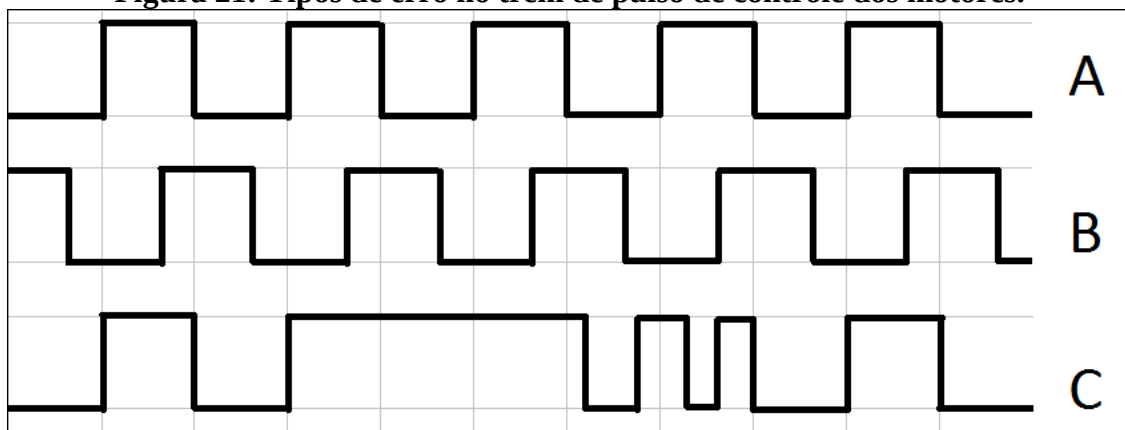
Neste capítulo foi apresentada a metodologia para a realização dos diferentes testes executados.

5.1. Avaliação da qualidade do trem de pulso

A qualidade do trem de pulso que o computador enviará aos drives dos motores refletirá diretamente na qualidade da usinagem tendo em vista que são esses pulsos os comandos responsáveis pela movimentação dos eixos. A variação indesejada da frequência do trem de pulsos é chamada de **Jitter** e é um desvio ou deslocamento de algum aspecto dos pulsos de um sinal digital sendo que o desvio pode ocorrer em termos de amplitude, tempo, fase ou extensão do pulso.

Observando informações contidas na documentação dos componentes presentes nas placas de acionamento dos motores de passo pode-se dizer que o aspecto mais importante do sinal de controle de passo é a frequência. A variação deste parâmetro pode causar vibração na estrutura, perda de passo e perda da sincronia entre eixos. Esses problemas são agravados na medida em que o trem de pulso fica desorganizado. Na Figura 21 pode-se ver a representação de alguns problemas no trem de pulso.

Figura 21: Tipos de erro no trem de pulso de controle dos motores.

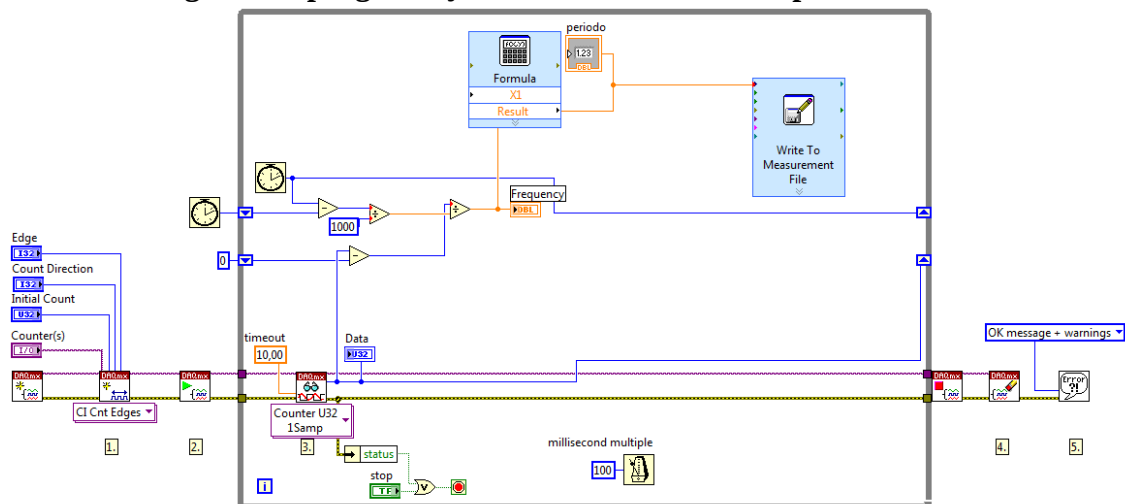


Fonte: Elaborado pelo autor.

A onda A na Figura 21 mostra a forma de onda ideal, já a onda B mostra um atraso no trem de pulsos o que acarretará em uma latência no movimento deste eixo o que afetará na sincronia entre eixos. A onda C da Figura 21 representa um atraso e logo após um aumento na frequência dos pulsos até se estabilizar e coincidir com a forma de onda ideal. Esse comportamento é o mais comum em computadores realizando tarefas simultâneas e pode causar perda de passos pelo motor devido à súbita aceleração.

Para se fazer a avaliação do trem de pulso fornecida pelo computador foi utilizado o software *Labview* juntamente com a placa de aquisição de dados da *National Instruments*. O objetivo aqui é medir o tempo entre cada borda de subida de um trem de pulso com frequência constante durante um tempo arbitrário que neste trabalho foi escolhido dez segundos. Após o tempo de medição foi calculada a média e o desvio padrão dos dados coletados. A tela da programação em blocos pode ser vista na Figura 22.

Figura 22: programação do Labview utilizada para os testes.



Fonte: Elaborado pelo autor.

A avaliação dos dados é bem simples sendo que quanto menor o desvio padrão calculado melhor é a qualidade do trem de pulsos.

Para uma melhor avaliação os testes foram feitos em cinco frequências diferentes sendo elas 20%, 40%, 60%, 80% e 100% da frequência máxima de acionamento dos motores. A fim de aumentar a probabilidade de defeitos no trem de pulso os três eixos devem estar em funcionamento durante os testes e deverá ser feito cinco repetições para cada eixo em cada frequência.

5.2. Avaliação de backlash

O backlash é um efeito que acontece em engrenamentos por causa da folga entre os dentes das engrenagens envolvidas. Quando ocorre uma inversão na direção de rotação é necessário uma quantidade de movimento até que a face oposta dos dentes das engrenagens se movimente por uma distância igual ao tamanho da folga, entrando em contato novamente transmitindo movimento. Essa folga mesmo sendo pequena tem um efeito acumulativo a cada reversão de movimento e levando em consideração que o

controle de posicionamento do sistema é em malha aberta, a identificação do backlash se mostra de grande importância para a precisão de posicionamento.

No firmware da mini CNC existe uma rotina para a identificação do backlash (Item 4.3.2) que será utilizada quando necessária durante a vida da máquina ferramenta. Para fazer a validação do método de identificação implementado na mini CNC foi realizado o procedimento descrito abaixo.

A identificação do backlash foi feita utilizando um relógio comparador Mitutoyo com resolução de 0,01 mm firmemente fixado a uma base magnética para medir a diferença de posição após uma reversão de movimento. A medição será feita na face da mesa da mini CNC perpendicular ao movimento.

Para iniciar as medições primeiramente foi acionado o eixo em que foi realizada as medições. O eixo deve ser deslocado para garantir que o conjunto fuso/castanha esteja engrenado. O relógio comparador deve ser encostado na mesa e zerado sendo marcado então o valor de referência. O eixo em questão deve ser movimentado um número de passos conhecidos na direção em que se afaste do relógio comparador. O mesmo número de passos deve ser dado em direção ao relógio comparador e o mesmo deve ser lido. Se o relógio comparador estiver marcando o valor de referência inicialmente lido, significa que a folga do eixo é inferior a sensibilidade do relógio comparador. Se o relógio estiver marcando um valor abaixo do valor de referência deve ser dado passos complementares até que o relógio comparador marque novamente o valor de referência. O número de passos suplementares dados é correspondente a folga do eixo e é este o valor a ser registrado juntamente com o erro de posição indicado no relógio comparador.

Esse procedimento deve ser repetido dez vezes para cada eixo e posteriormente o valor calculado do backlash será agregado ao programa de controle (Mach 3) para ser feito a compensação.

A medição do número de passos necessários para compensar a folga do eixo é importante pelo fato de alguns softwares de controle similares ao Mach 3 e o próprio firmware de controle da mini CNC terem como unidade de medida de deslocamento o número de passos dados pelo motor e não uma unidade física de deslocamento como o milímetro.

A rotina de identificação de backlash presente no firmware da mini CNC será validada através da comparação com os valores das medições feita com este procedimento.

5.3. Avaliação da função de referenciamento

O erro inerente ao referenciamento é herdado pelas demais operações da mini CNC o que justifica o estudo do mesmo. Em outras palavras, pode-se dizer que a incerteza do sistema será pelo menos igual à incerteza desta função já que a incerteza de posicionamento contém a incerteza de referenciamento. Abaixo é descrito como foi conduzido os testes para avaliar o erro de referenciamento:

- a) A função de referenciamento deve ser executada com a mesa da mini CNC iniciando em pontos aleatórios e que abranjam todo curso do eixo;
- b) A medição foi realizada utilizando um relógio comparador Mitutoyo com resolução de 0,01 milímetros;
- c) A mesa deverá ser movimentada para uma posição aleatória e a função de referenciamento deverá ser executada novamente;
- d) Essa sequência deverá ser repedida pelo menos dez vezes.

5.4. Avaliação de posicionamento

O erro de posicionamento dos carros da mini CNC tem influência diretamente no desvio de forma das peças usinadas, mas não é o único fator a contribuir. A fim de identificar apenas a parcela de incerteza que o posicionamento influi no resultado final das peças usinadas foi avaliado o posicionamento da mesa da mini CNC.

Os testes foram realizados com movimentos simples e com apenas um eixo em movimento. Foi analisado o erro de posicionamento em quatro pontos 25, 50, 75 e 100% do percurso total do eixo. Os passos para o teste estão abaixo:

- a) O sistema deve ser referenciado e deve começar na posição zero. Assim não haverá a influência de possíveis erros causados por backlash, já que após o referenciamento o engrenamento do fuso já está no sentido do movimento subsequente;
- b) Deverá ser enviada a ordem de movimentação da mesa para a posição escolhida onde será feita a medida com relógio comparador Mitutoyo com resolução de 0,01 milímetros;
- c) Antes da próxima medição a mini CNC foi novamente referenciada;
- d) Foram feitas dez medidas;

- e) Esse procedimento foi repetido para o deslocamento de 25%, 50%, 75% e 100% de deslocamento do eixo.

Após esta bateria de testes foi calculado o erro de posicionamento da mini CNC. Este erro tem como componentes apenas a incerteza do movimento (de apenas um eixo), a incerteza de referenciamento (neste ponto essa incerteza já é conhecida) e a incerteza do relógio comprador. Com esses dados é possível saber apenas a influência que o software de controle juntamente com a parte mecânica tem no erro de posicionamento.

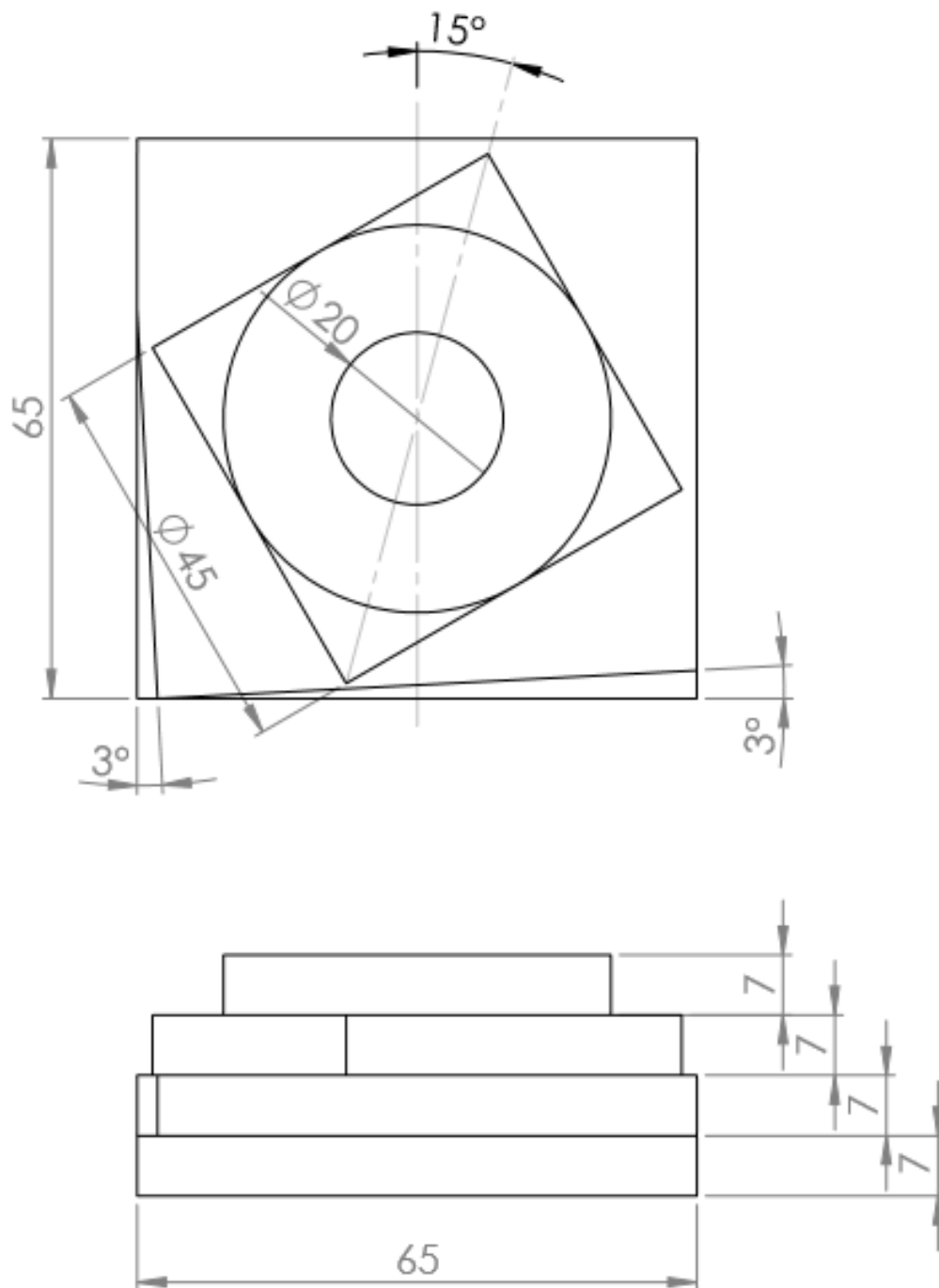
5.5. Avaliação do desvio de forma

A metodologia utilizada para avaliar as peças usinadas pela mini CNC é baseada na norma ISO 10791-7. Nesta norma é apresentada a geometria de uma peça teste que deve ser usinada em condições específicas como foi apresentado no Item 2.4.

Tendo em vista que a norma apresentada anteriormente visa avaliar máquinas ferramentas de porte industrial algumas adaptações foram feitas para tornar possível a realização dos testes na mini CNC.

Foi feito a redução das dimensões da peça para se adequar ao curso de cada eixo da mini CNC. O curso dos eixos da máquina ferramenta a ser avaliada é de 100 mm para o eixo X, 90 mm para o eixo Y e 150 mm para o eixo Z. Por esse motivo as dimensões da peça teste foram reduzidas ficando com as dimensões mostradas na Figura 23. Outro ponto que pode ser observado nesta Figura é a ausência dos quatro furos nas extremidades da base, esses furos foram removidos para diminuir o número de medições a serem feitas.

Figura 23: Desenho da peça teste utilizada.



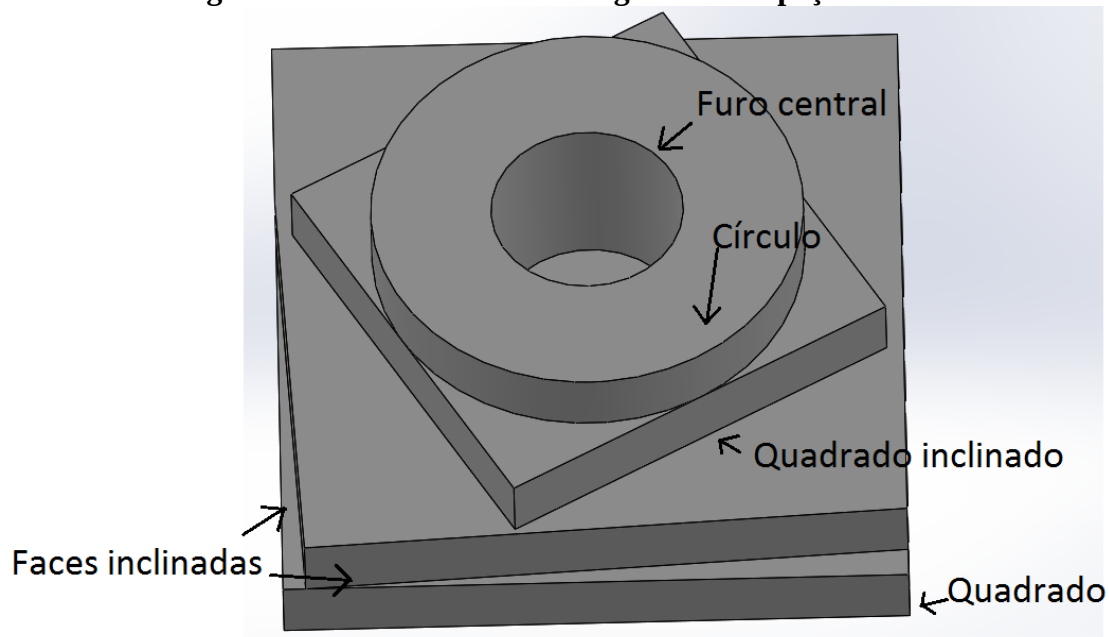
Fonte: Elaborada pelo autor.

As medições feitas na peça usinada são as descritas no Quadro 2 e todas elas foram feitas utilizando uma máquina de medida tridimensional Mitutoyo QM DATA 440 e os resultados estão apresentados no Capítulo 5. A Figura 24 mostra a nomenclatura utilizada para cada seguimento da peça teste.

Quadro 2: Parâmetros a serem medidos da peça teste.

Tipo de medida	Segmento da peça
Diâmetro	Furo central
Perpendicularidade entre a linha de centro do furo e o quadrado	Furo central
Diâmetro	Circulo
Circularidade	Circulo
Concentricidade do círculo externo e o furo mandrilado C	Circulo
Dimensão entre face 1 e 3	Quadrado inclinado
Dimensão entre face 2 e 4	Quadrado inclinado
Retitude do lado 1	Quadrado inclinado
Retitude do lado 2	Quadrado inclinado
Retitude do lado 3	Quadrado inclinado
Retitude do lado 4	Quadrado inclinado
Exatidão dos ângulos de 30 em relação ao quadrado (graus)	Quadrado inclinado
Retitude da face 1	Faces inclinadas
Retitude da face 2	Faces inclinadas
Exatidão dos ângulos em relação ao quadrado face 1	Faces inclinadas
Exatidão dos ângulos em relação ao quadrado face 2	Faces inclinadas
Dimensão entre face 1 e 3	Quadrado
Dimensão entre face 2 e 4	Quadrado
Retitude do lado 1	Quadrado
Retitude do lado 2	Quadrado
Retitude do lado 3	Quadrado
Retitude do lado 4	Quadrado
Ângulo entre a face 1 e 3	Quadrado
Ângulo entre a face 2 e 4	Quadrado

Fonte: Elaborada pelo autor.

Figura 24: Nomenclatura dos segmentos da peça teste.

Fonte: Elaborada pelo autor.

A peça foi fixada na min CNC com o auxílio de uma morsa prendendo a face rebaixada inferior à base quadrada. Os parâmetros de corte também devem ser adequados devido a capacidade da mini CNC. Os parâmetros de corte utilizados foram escolhidos empiricamente e serão apresentados no capítulo referente aos resultados.

O material a ser usinado será o poliacetal e a ferramenta utilizada será uma fresa de topo de seis milímetros, com 4 arestas cortantes, fabricada com aço rápido. Para as medições foi usinada uma peça teste.

Para gerar o código G referente à usinagem desta peça primeiramente foi feito seu desenho no software SolidWorks. Este desenho foi importado no software EdgeCAM responsável por gerar o código G que foi aberto no software de controle da mini CNC Mach 3.

6. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Este capítulo contém os resultados e discussões dos testes cujas metodologias foram apresentadas no capítulo anterior.

6.1. Qualidade do trem de pulsos

Neste item foram apresentados os resultados obtidos dos testes de avaliação do trem de pulso. Em um primeiro momento foi apresentado resultados preliminares com intuito de validar a metodologia aplicada utilizando outro software também disponível no mercado o *TURBO CNC*. Em um segundo momento foram apresentados os dados do teste completo.

6.1.1. Resultados preliminares

Para uma primeira avaliação do computador que foi utilizado para controlar a mini CNC e também do método de avaliação foi realizado um teste simplificado. Este teste seguiu de forma simplificada a metodologia anteriormente descrita sendo realizada a avaliação de apenas uma frequência e em apenas um eixo.

A frequência escolhida para o teste foi 100 HZ que foi configurada no software de controle de máquinas CNC Turbo CNC. Os dados foram salvos no Labview a uma frequência de 10 Hz o que resultou em cerca de 100 pontos coletados ao final dos dez segundos de aquisição.

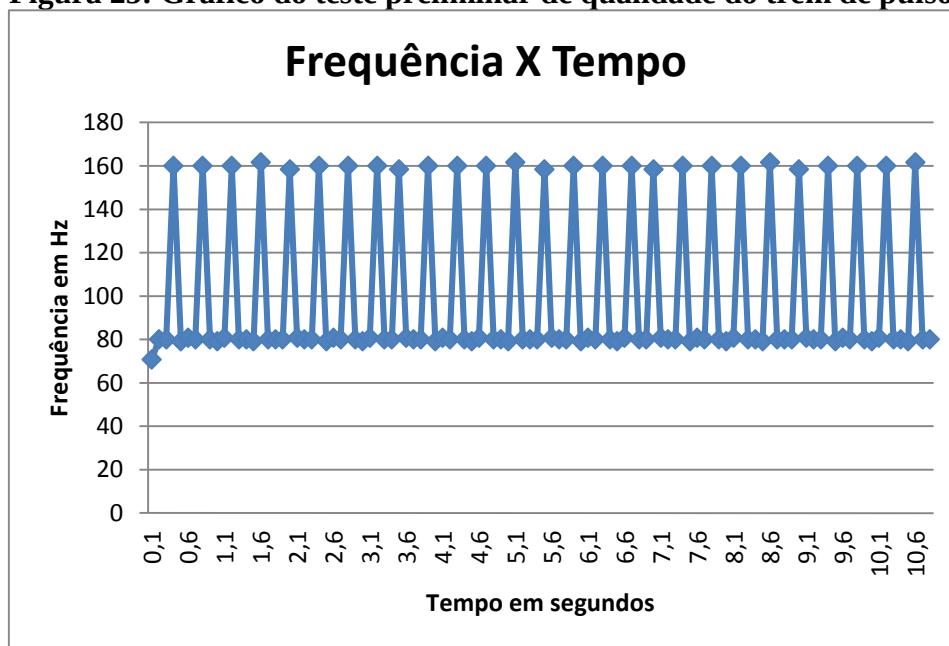
Foi realizada uma tomada de dados extra para controle utilizando um gerador de função. Esse gerador de função estava configurado para fornecer uma onda quadrada de frequência de 100 Hz, mas foi observado em seu display uma variação de ± 1 Hz.

A Tabela 1 mostra os valores de média do período entre as bordas de subida do trem de pulso e o desvio padrão de cada bateria de dados. Pode-se ver que o desvio padrão do tempo entre as bordas de subida dos pulsos gerados pelo computador é dez vezes maior que os pulsos gerados pelo gerador de funções. Isso mostra que os pulsos gerados pelo computador têm um problema de constância promovendo aumentos bruscos na frequência o que ocasiona perda de passo no motor. Isso pode ser mais claramente visto na Figura 25 onde mostra os dados de uma repetição do teste e com o período transformado em frequência.

Tabela 1: Dados do teste preliminar de qualidade do trem de pulso.

Repetição	Média (s)	Desvio padrão
1	0,01095	0,00273
2	0,01092	0,00273
3	0,01089	0,00277
4	0,01089	0,00277
5	0,01092	0,00273
Controle	0,00999	0,00023

Fonte: Elaborado pelo autor.

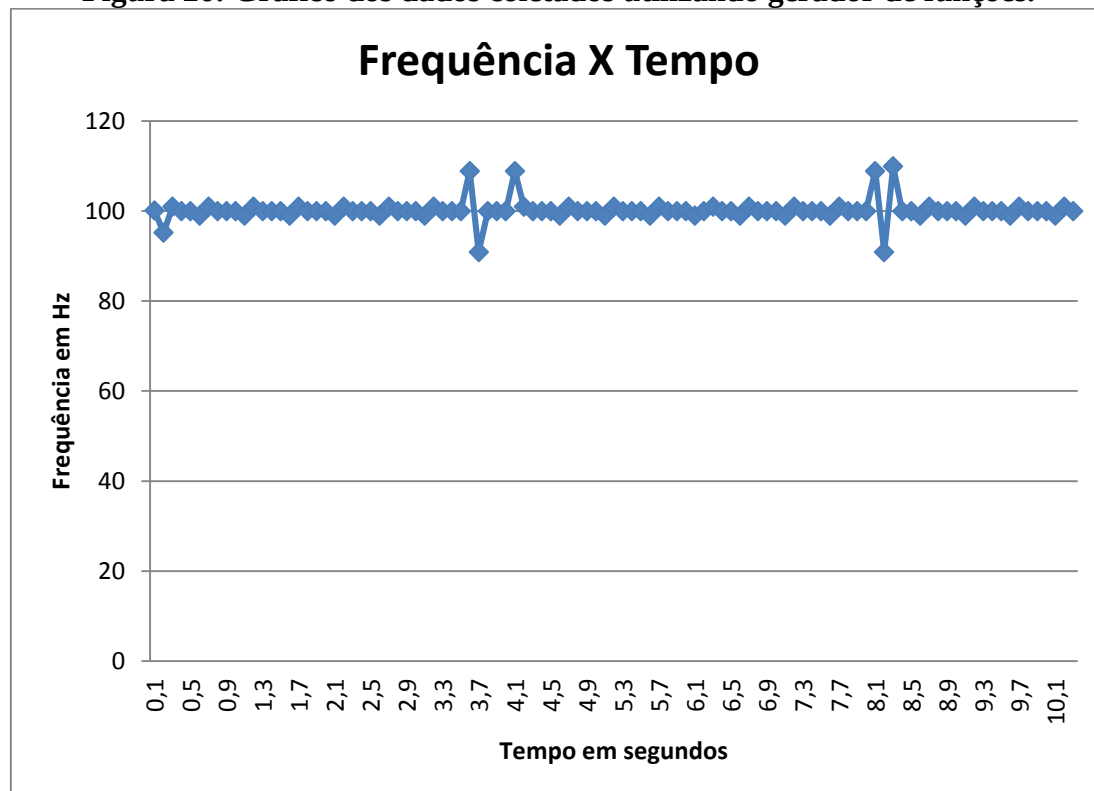
Figura 25: Gráfico do teste preliminar de qualidade do trem de pulso.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Facilmente pode-se notar no gráfico que existe um aumento brusco periódico na frequência do trem de pulso e também é observado que a frequência de estabilização é de 80 Hz que é discrepante da frequência configurada no software Turbo CNC que foi de 100 Hz.

Para ficar ainda mais claro os problemas no trem de pulso representado no gráfico da Figura 25 deve-se compara-lo com o gráfico gerado pelos dados do teste de controle, apresentados na Figura 26, que representa a medição da onda de um gerador de funções.

Figura 26: Gráfico dos dados coletados utilizando gerador de funções.



Fonte: Elaborado pelo autor.

6.1.2. Teste completo

Após ser verificada uma inconstância na frequência que controla o movimento dos motores através dos testes apresentados no item anterior e também através da observação do funcionamento do motor foi decidido a troca do software de controle. O software adotado então foi o Mach 3, apresentado no Item 4.2 e este foi utilizado em todos os testes da mini CNC.

Na Tabela 2 pode ser visto os dados dos testes referentes à qualidade do trem de pulso gerado no computador e que tem como função dar passos nos motores. Nesta tabela pode ser visto a média da frequência durante cada repetição do teste e após a linha com os dados da quinta repetição podemos ver uma média dos valores acima, o que também acontece com os valores de desvio padrão.

Tabela 2: Teste de qualidade do trem de pulso para um eixo

Frequência alvo 1682,66			Frequência alvo 3365,32		
	Média (Hz)	Desvio padrão (Hz)		Média (Hz)	Desvio padrão (Hz)
Repetição 1	1682,60	0,0773	Repetição 1	3365,43	0,0773
Repetição 2	1682,70	0,1022	Repetição 2	3365,25	0,1022
Repetição 3	1682,72	0,1126	Repetição 3	3365,30	0,1126
Repetição 4	1682,60	0,0725	Repetição 4	3365,29	0,0725
Repetição 5	1682,69	0,0995	Repetição 5	3365,35	0,0995
Média	1682,66	0,0928	Média	3365,32	0,0928
Frequência alvo 5047,98			Frequência alvo 6730,64		
	Média	Desvio padrão		Média	Desvio padrão
Repetição 1	5047,90	0,0115	Repetição 1	6730,56	0,1089
Repetição 2	5048,01	0,0117	Repetição 2	6730,12	0,0984
Repetição 3	5047,95	0,0110	Repetição 3	6730,60	0,0596
Repetição 4	5047,90	0,0115	Repetição 4	6730,70	0,0852
Repetição 5	5048,10	0,0108	Repetição 5	6730,75	0,0683
Média	5047,97	0,0113	Média	6730,55	0,0841
Frequência alvo 8413,30					
	Média	Desvio padrão			
Repetição 1	8413,40	0,0269			
Repetição 2	8413,56	0,0164			
Repetição 3	8413,10	0,0174			
Repetição 4	8413,21	0,0160			
Repetição 5	8413,15	0,0178			
Média	8413,28	0,0190			

Fonte: Elaborado pelo autor.

Devido à configuração de operação em micro passo dos drives de acionamento dos motores e o passo do fuso presente nos eixos é necessário que o software de controle de 1262 pulsos para o eixo movimentar um milímetro. A velocidade máxima dos eixos X e Y é de 400 mm/min e o eixo Z é de 80 mm/min. A partir destes dados pode ser calculada a frequência máxima que o software de controle pode enviar para o eixo chegar a sua máxima velocidade. Esse cálculo está presente na Equação 18 e nada mais é que a multiplicação da quantidade de pulsos necessários para movimentar um milímetro pela velocidade máxima do eixo dividido por sessenta para o resultado ser em pulsos por segundo.

$$f_{max} = \frac{1262 \cdot 400}{60} = 8413,3 \text{ Hz} \quad (18)$$

A velocidade máxima do eixo foi obtida observando o ponto em que os eixos se deslocam sem perder passos.

Na Tabela 2 pode ser visto um valor máximo de desvio padrão de 0,0928Hz que pode ser interpretado como a variação da frequência no trem de pulso. A variação que essa oscilação na frequência causa na velocidade pode ser expressa em mm/min calculando a velocidade que um trem de pulso com frequência de 0,0928Hz imprimiria no eixo. Esse cálculo é feito dividindo a frequência dos pulsos pelo número de passos necessários para o eixo se movimentar um milímetro e multiplicando por sessenta para o resultado ser em milímetros por minuto como pode ser visto na Equação 19.

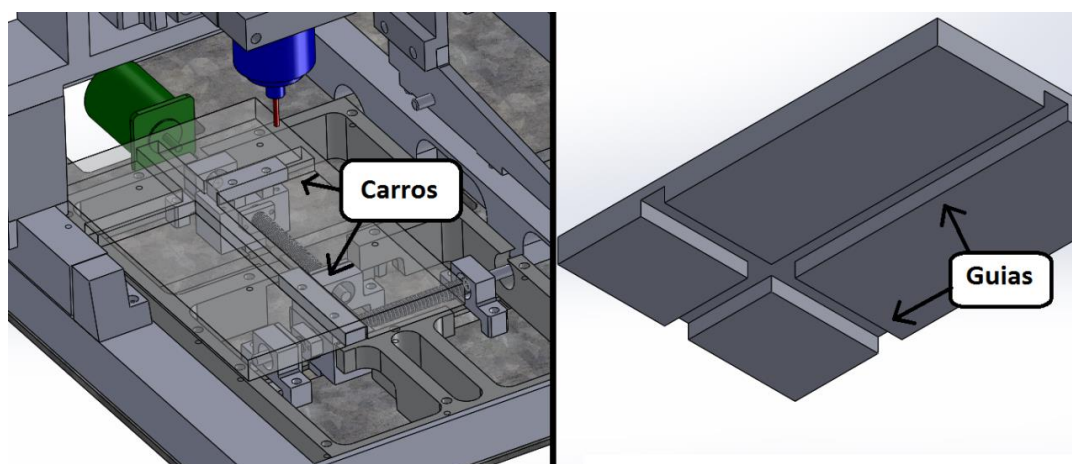
$$v = \frac{0,0928}{1262} * 60 = 0,0044 \text{ mm/min} \quad (19)$$

Então a variação máxima na velocidade dos motores é de 0,0044 mm/min. Fazendo uma análise visual do funcionamento dos motores essa variação de velocidade não causa nenhum funcionamento fora do normal.

6.2. Avaliação de backlash

Primeiramente a avaliação do backlash foi realizada tomando como ponto de medição o carro de cada eixo, mas as medições mostraram um valor abaixo da sensibilidade do relógio comparador que era de 0,01mm. Mesmo realizando conjunto de dez inversões de sentido de movimentação antes de se fazer a medição não sendo possível medir o backlash com o relógio comparador utilizado.

Fazendo uma análise do conjunto responsável pela movimentação da mesa mostrou que mesmo se fosse possível realizar as medições como foram descritas os valores não estariam totalmente corretos já que uma parte do conjunto e talvez a que teria maior influência não estava sendo avaliada. Os mecanismos que tendem a influenciar mais no backlash é o encaixe entre as guias da mesa com os carros de cada eixo. Essas guias podem ser vista nas Figuras 27 e necessita de atenção em seu ajuste, pois elas não podem ficar demasiadamente apertadas a ponto de impedir o deslocamento do eixo mas também não podem ter grande folga pelo fato de aumentar o backlash.

Figura27: Detalhe dos carros e guias dos eixos X e Y.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Após essas observações pode se chegar a duas conclusões, primeira sobre o melhor local para realizar as medições que seria diretamente na mesa. Segunda conclusão é que a rotina de avaliação do backlash realizada pelo micro controlador não tem grande significância já que o acionamento do fim de curso é feito pelo carro do eixo não sendo medida a influência do acoplamento entre as guias da mesa e os carros. Devido essa segunda conclusão a validação da rotina de identificação do backlash foi abandonada.

O eixo Z também não foi avaliado pelo fato de estar na posição vertical e o peso do conjunto carro do eixo mais suporte e motor spindle ficarem empurrando constantemente o carro para baixo não possibilitando assim haver o desengrenamento entre castanha e o fuso deste eixo. Os dados dos demais eixos estão apresentados nas Tabelas 3 e 4.

Tabela 3: Avaliação do backlash no eixo X.

Repetição	Desvio de posição (mm)
1	0,26
2	0,24
3	0,13
4	0,18
5	0,20
6	0,21
7	0,17
8	0,19
9	0,23
10	0,21
Média	0,20
Desvio padrão	0,04

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 4: Avaliação do backlash no eixo Y.

Repetição	Desvio de posição (mm)
1	1,25
2	1,17
3	1,21
4	1,16
5	1,14
6	1,26
7	1,28
8	1,18
9	1,20
10	1,21
Média	1,21
Desvio padrão	0,05

Fonte: Elaborado pelo autor.

É observada uma diferença de mais de seis vezes entre o backlash medido no eixo Y (1,21mm) para o medido no eixo X (0,20mm). Uma explicação para isso é o tipo de ajuste feito nas guias que promoveu maior folga no encaixe do eixo Y.

O valor da média aritmética das medições foi configurado no programa Mach 3 para ser realizada a compensação. Após realizar a configuração do Mach foram realizadas novas medições e novamente não foi possível medir com o relógio comparador o que indica que o erro de posicionamento devido o backlash é menor que 0,01mm.

6.3. Avaliação da função de referenciamento

Os dados obtidos a partir destas medições mostram a precisão de dois aspectos da máquina. O primeiro aspecto é a chave fim de curso que possui uma variação na posição, onde muda de estado informando que esta foi acionada. O segundo é se o micro controlador envia comando para o motor dar passo após a chave de fim de curso ser acionada. Esses dois aspectos juntos compõem o erro de posicionamento na posição de home e os dados das medições deste erro podem ser vistos nas Tabelas 5, 6 e 7.

Tabela 5: Avaliação do referenciamento do eixo X.

Número do ensaio	Erro (mm)
1	-0,02
2	0,00
3	0,02
4	-0,01
5	0,01
6	-0,01
7	0,01
8	0,00
9	0,00
10	-0,01
Média	-0,0015
Desvio Padrão	0,0116

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 6: Avaliação do referenciamento do eixo Y.

Número do ensaio	Erro (mm)
1	-0,02
2	0,01
3	0,01
4	-0,01
5	0,01
6	-0,01
7	0,01
8	0,00
9	0,00
10	-0,01
Média	-0,0010
Desvio Padrão	0,0110

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 7: Avaliação do referenciamento do eixo Z.

Número do ensaio	Erro (mm)
1	-0,01
2	0,00
3	-0,01
4	0,01
5	0,01
6	0,00
7	0,02
8	-0,01
9	0,00
10	0,00
Média	0,0010
Desvio Padrão	0,0099

Fonte: Elaborado pelo autor.

Os dados coletados são bem consistentes para os três eixos apresentando um valor médio da variação de posicionamento de 0,0015 mm para o eixo X, 0,0010 mm para o eixo Y e Z. O desvio padrão das medidas para X, Y e Z são respectivamente de 0,0116; 0,0110 e 0,0099.

6.4. Avaliação de posicionamento

São apresentados nas Tabelas 8, 9 e 10 os dados referentes aos erros de posicionamento dos três eixos da mini CNC.

Tabela 8: Teste posicionamento para eixo X.

Número do ensaio	Erro em 25% do curso (mm)	Erro em 50% do curso (mm)	Erro em 75% do curso (mm)	Erro em 100% do curso (mm)
1	0,00	0	0	0
2	0,00	0	0	0
3	0,01	0	0,01	0
4	0,01	0	0,01	0,02
5	0,01	0	0,01	0,01
6	0,01	-0,01	0	0,01
7	0,01	0	0	0,01
8	0,00	0	0,01	0
9	0,01	-0,01	0,01	0
10	0,01	-0,01	0	0
Média	0,0070	-0,0030	0,0050	0,0050
Desvio padrão	0,0048	0,0048	0,0053	0,0071

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 9: Teste posicionamento para eixo Y.

Número do ensaio	Erro em 25% do curso (mm)	Erro em 50% do curso (mm)	Erro em 75% do curso (mm)	Erro em 100% do curso (mm)
1	0	0	-0,01	0
2	0	0,01	-0,01	0
3	0	0	-0,01	0
4	0	0	-0,01	0
5	-0,01	0	-0,01	0
6	-0,01	0	-0,01	0
7	0	0	-0,01	0
8	-0,01	0	-0,01	0,01
9	0	0	-0,02	0,01
10	0	0	-0,01	0,01
Média	-0,0030	0,0010	-0,011	0,0030
Desvio padrão	0,0048	0,0032	0,0032	0,0048

Fonte: Elaborado pelo autor.

Tabela 10: Teste posicionamento para eixo Z.

Número do ensaio	Erro em 25% do curso (mm)	Erro em 50% do curso (mm)	Erro em 75% do curso (mm)	Erro em 100% do curso (mm)
1	-0,01	0	0,01	0,01
2	0	0,01	0,01	0
3	0,01	-0,02	0	0
4	0	0	0	0,01
5	-0,01	0,01	0,02	0
6	-0,01	-0,01	0	-0,01
7	-0,01	0	0	0,01
8	-0,01	0	0,01	-0,01
9	0,01	-0,1	-0,01	0,01
10	0	-0,01	-0,01	0,01
Média	-0,0030	-0,0030	0,0030	0,0030
Desvio padrão	0,0082	0,0095	0,0095	0,0082

Fonte: Elaborado pelo autor.

Observando os dados pode ser notado um aumento do desvio padrão para o posicionamento do eixo Z e valores mais próximos nos desvios dos eixos X e Y. No valor das médias dos dados os eixos apresentaram valores espalhados entre -0,0030mm a 0,0070mm.

Para calcular a incerteza presente na medida do erro médio de posicionamento da mini CNC deve ser visto todos os componentes que podem influenciar no processo de referenciamento. Alguns componentes como a influência do algoritmo presente no micro controlador responsável pela rotina de referenciamento e eletrônica de potência para acionar os motores não foram avaliados em separados mas sua influência está por natureza presente no resultado final. Para este cálculo será levado em consideração à incerteza de referenciamento, de posicionamento e do relógio comparador utilizado nas medições.

A incerteza do tipo A que foi utilizada para o cálculo da incerteza das medições é o desvio padrão das medidas de posicionamento e de referenciamento. Para os dois parâmetros serão utilizados os maiores valores a fim de se ter o pior caso. Usando a Equação 11 e os dados referentes ao eixo X de referenciamento e os dados do eixo Z de posicionamento temos as Equações 20 e 21:

$$u_r = \frac{0,0116}{\sqrt{10}} = 0,0037 \text{ mm} \quad (20)$$

$$u_p = \frac{0,0095}{\sqrt{10}} = 0,0030 \text{ mm} \quad (21)$$

A incerteza do tipo B presente é a incerteza do relógio comparador devido sua resolução e essa informação é fornecida pelo fabricante. Podemos considerar que esta

incerteza possui uma distribuição retangular que pela Equação 12 será calculado seu valor.

$$u_2 = \frac{0,01}{\sqrt{3}} = 0,0058 \text{ mm} \quad (22)$$

A incerteza combinada das medidas de posicionamento pode ser calculada pela Equação 14.

$$u_c = \sqrt{0,0037^2 + 0,0030^2 + 0,0058^2} = 0,0075 \text{ mm} \quad (23)$$

O número de graus de liberdade é calculado pela Equação 16.

$$v_{ef} = \frac{0,0075^4}{\frac{0,0037^4}{9} + \frac{0,0030^4}{9}} = 106,9859 \quad (24)$$

A incerteza expandida das medidas de posicionamento pode ser calculada pela Equação 17 sendo que o fator de expansão para o número de graus de liberdade calculado anteriormente é 2,02. O fator de expansão K é para um nível de confiança de 95%.

$$U_{95} = 2,02 \times 0,0075 = 0,0151 \text{ mm} \quad (25)$$

Após esses cálculos pode se dizer que o posicionamento da mini CNC tem um erro máximo de $\pm 0,0151\text{mm}$.

6.5. Avaliação do desvio de forma

Após várias tentativas de se usinar a peça teste foram escolhidos os parâmetros de corte tendo como critério principal o tempo de usinagem. Em velocidades de corte próximas das máximas alcançadas pelos motores a mini CNC mostrou perder passo e por consequência a peça usinada foi comprometida. Em velocidades muito baixas o tempo de usinagem se tornou muito longo, superiores há duas horas por peça. Mesmo com os eixos X e Y alcançando velocidades de 400 mm/min para deslocamento, não é possível usinar a estas velocidades devido ao aumento da resistência ao movimento que o processo de usinagem gera naturalmente o que leva a perda de passo. Os parâmetros de cortes selecionados para a realização destes foram:

- a) Velocidade de corte de 200 mm/min;
- b) Profundidade de corte de 5mm para desbaste e 3mm para acabamento;
- c) Rotação da ferramenta de 15000 rpm;
- d) Erro de posicionamento configurado no EdgeCAM de 0,01mm.

Utilizando esses parâmetros foi possível usar a pesa teste com o tempo de uma hora e quarenta minutos e com uma qualidade satisfatória como pode ser observado pelos dados contidos na Tabela 11.

Tabela 11: Teste de qualidade de usinagem.

(continua)

Medida	Repetição 1	Repetição 2	Repetição 3	Repetição 4	Repetição 5	Média	Desvio padrão
Furo central							
Diâmetro (mm)	45,078	45,332	45,035	45,078	44,785	45,062	0,194
Perpendicularidade entre a linha de centro do furo e o quadrado (mm)	0,074	0,351	0,286	0,377	0,164	0,250	0,128
Círculo							
Diâmetro (mm)	19,953	19,778	19,669	19,787	20,449	19,927	0,3088
Circularidade (mm)	1,340	1,160	1,215	1,040	1,130	1,177	0,111
Concentricidade do círculo externo e o furo central (mm)	0,599	0,347	0,320	0,213	0,504	0,397	0,1537
Quadrado inclinado							
Dimensão entre face 1 e 3 (mm)	45,697	45,69	45,762	45,685	45,747	45,716	0,036
Dimensão entre face 2 e 4 (mm)	45,761	45,757	45,697	45,695	45,690	45,720	0,036
Retitude do lado 1 (mm)	0,011	0,015	0,010	0,025	0,045	0,021	0,015
Retitude do lado 2 (mm)	0,030	0,030	0,015	0,014	0,052	0,028	0,015
Retitude do lado 3 (mm)	0,023	0,027	0,017	0,026	0,035	0,026	0,007
Retitude do lado 4 (mm)	0,040	0,014	0,053	0,027	0,092	0,045	0,030
Exatidão dos ângulos de 30 em relação ao quadrado (graus)	29,5927	29,5908	29,9171	29,5906	29,9793	29,7341	0,1967
Faces inclinadas							
Retitude da face 1 (mm)	0,017	0,017	0,016	0,013	0,015	0,016	0,002
Retitude da face 2 (mm)	0,016	0,013	0,015	0,017	0,016	0,015	0,002
Exatidão dos ângulos em relação ao quadrado face 1 (graus)	2,5447	2,5447	2,5805	2,5641	2,5401	2,5548	0,0171

(conclusão)

Exatidão dos ângulos em relação ao quadrado face 2 (graus)	3,0525	3,0307	3,0235	3,0535	3,0335	3,0387	0,0135
Quadrado							
Dimensão entre face 1 e 3 (mm)	66,094	66,084	65,993	66,117	66,067	66,071	0,047
Dimensão entre face 2 e 4 (mm)	65,227	65,222	65,246	65,024	65,208	65,185	0,091
Retitude do lado 1 (mm)	0,007	0,011	0,150	0,018	0,025	0,042	0,061
Retitude do lado 2 (mm)	0,020	0,010	0,030	0,015	0,025	0,020	0,008
Retitude do lado 3 (mm)	0,026	0,027	0,025	0,030	0,015	0,025	0,006
Retitude do lado 4 (mm)	0,017	0,022	0,035	0,030	0,020	0,025	0,007
Ângulo entre a face 1 e 3 (graus)	89,5759	89,5523	90,0803	89,5745	89,5720	89,6710	0,2290
Ângulo entre a face 2 e 4 (graus)	89,5229	89,4253	89,4726	89,4720	89,5221	89,4830	0,0409

Fonte: Elaborado pelo autor.

Analisando os dados presentes na Tabela 11 podem ser retirados vários dados sobre os aspectos de movimentação, sincronismo entre eixos e alinhamento dos eixos da mini CNC. As formas usinadas como o furo central, o círculo, o diamante e as faces inclinadas necessitam de sincronismo entre os eixos X e Y para serem usinadas, exigindo então uma constância nas velocidades dos eixos e precisão de posicionamento. Para se ter perpendicularidade entre a linha de centro do furo e o quadrado a máquina ferramenta precisa ter o eixo Z da máquina alinhado corretamente para ser perpendicular ao plano formado pelos eixos X e Y. Medindo os ângulos entre as faces do quadrado é possível ver se os eixos X e Y estão posicionados perpendicular um em relação ao outro.

A média do diâmetro do furo central e do círculo mostraram um erro com relação as dimensões do desenho de +0,062mm e -0,073mm respectivamente. Os erros das dimensões do quadrado inclinado e do quadrado são de 0,036mm e 0,091mm respectivamente. Esses dados mostram que existe um erro de posicionamento máximo (para esses dados em específico) de 0,091mm. Esse dado é discrepante do erro de posicionamento encontrado medindo apenas o deslocamento.

A perpendicularidade entre a linha de centro do furo e o quadrado mostra que o eixo Z está desalinhado com relação ao plano XY pelo fato das medidas mostrarem um valor

de 0,250mm. A circularidade mostra a variação entre a sincronia dos eixos X e Y na hora de usinar o círculo causando um efeito de ondulação na parede do círculo e seu valor foi de 1,177mm. A concentricidade mostra se a referência para se usinar o furo central e o círculo foram iguais e a média dessa medida foi de 0,397mm.

A retitude mostra se durante a usinagem da face medida ocorreu algum tipo de ondulação que podem ser causadas por um desalinhamento nas guias dos eixos no caso da face em questão estar paralela aos eixos da máquina ou por uma variação de velocidade de algum dos eixos no caso das faces estarem inclinadas em relação aos eixos da máquina. A maior média medida deste parâmetro foi de 0,044mm para uma das paredes do quadrado inclinado.

A medição dos ângulos entre as faces do quadrado mostra também o ângulo entre o eixo X e Y e no caso do quadrado inclinado e nas faces inclinadas mostram o sincronismo entre os eixos. O erro máximo da média das medições deste parâmetro teve o valor de 0,5170 graus.

7. CONCLUSÕES

Após os testes avaliando a mini CNC é possível concluir:

- a) A variação na frequência do trem de pulsos responsável pela movimentação dos eixos não tem grande influência na qualidade da usinagem uma vez que mostrou chegar apenas a 0,0011% da velocidade máxima de deslocamento e a 0,0022% da velocidade de corte que foi utilizada para realizar o processo de usinagem.
- b) Não é interessante avaliar o backlash diretamente no carro do eixo uma vez que o acoplamento entre a mesa e o carro também pode apresentar folga. Para fazer uma avaliação automatizada do backlash deve ser estudado como fixar a chave fim de curso diretamente na mesa.
- c) Uma vez identificado o backlash é plenamente possível compensá-lo configurando o Mach 3 corretamente.
- d) O erro de posicionamento teve como maior influência o erro de referenciamento o que leva ser necessário melhorar o método de se fazer o referenciamento dos eixos para que se tenha um ganho direto na precisão de posicionamento.
- e) A avaliação do corpo de prova mostrou valores de erros maiores que os esperados observando apenas os testes de posicionamento e frequência do trem de pulso. Essa discrepância nos valores indica que outros componentes do processo como o programa CAM responsável por gerar o código G, a fixação do motor spindle construída em nylon e fixação da peça devem estar contribuindo para os erros.
- f) O alinhamento dos eixos da máquina ferramenta é de grande importância e através da usinagem desse tipo de corpo de prova é possível tirar conclusões sobre ele. No caso da mini CNC o eixo Z deve ser alinhado corretamente.

8. SUGESTÃO DE TRABALHOS FUTUROS

É recomendável no futuro fazer a avaliação do alinhamento dos eixos da mini CNC a fim de se alcançar maior precisão nas peças usinadas. A utilização de um controle de posicionamento em malha fechada e a substituição dos motores por motores DC ou AC auxiliaria no aumento da velocidade máxima de deslocamento e de usinagem sem o risco de perder referência de posicionamento.

REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6405**: rugosidade das superfícies. Rio de Janeiro, janeiro, 1988.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6409**: tolerâncias de forma e tolerâncias de posição. Rio de Janeiro, 1976.

CANEVAROLO JÚNIOR, S. V. **Ciência dos polímeros**: um texto básico para tecnólogos e engenheiros. São Paulo: Artliber, 2002.

Biografia de pessoas famosas. Disponível em <<http://www.top-biography.com/navigation%20menu>> Acesso em: 13 de Abril de 2012.

Breve historia do CNC. Disponível em <<http://www.utm.edu/departments/engin/lemaster/Auto%20Prod%20Sys/Notes%2022.pdf>> Acesso em: 15 de Abril de 2012

DINIZ, A. E.; MARCONDES, F. C.; COPPINI, N. L. **Tecnologia da usinagem dos materiais**. 6.ed. São Paulo: ArtliberEditora, 2008. 262 p.

Geldart, P. Webb, H. Larsson, M. Backstrom, N. Gindy, K. Rask. A direct comparison of the machining performance of a variac 5 axis parallel kinetic machining centre with conventional 3 and 5 axis machine tools. **International Journal of Machine Tools & Manufacture** **43**, August 2003, Pages 1107–1116.

Gorgulho Júnior, J. H. C. **Operação de fresamento**. Itajuba. 2009

Handbook of manufacturing automation and integration (Edição 1980, USA) Numerical control in manufacturing-Frank W. Wilson (USA), Mc-Graw Hill Book Company

História da informática. Disponível em <<http://www.histoire-informatique.org>> Acesso em: 14 de Abril de 2012

História das máquinas. Disponível em <<http://www.chez.com/vaste/technique.htm>> Acesso em: 13 de Abril de 2012

História do aço. Disponível em <<http://www.iron.oakengates.com>> Acesso em: 14 de Abril de 2012

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ISO 203: Machine tools – Test code for machine tools – Part 2: Determination of accuracy and repeatability of positioning numerically controlled axes. 1997.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ISO 10791: Test conditions for machining centres - Part 7: Accuracy of a finished test piece. 1999.

J Dong, C Yuan, J. A. Stori, P. M Ferreira. Development of a high-speed 3-axis machine tool using a novel parallel-kinematics X-Y table. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. Volume 44, Issues 12–13, October 2004, Pages 1355–1371

Jozef Beňo, Ildikó Maňková, Marek Vrabel, Daniel Kottfer. Roughness measurement methodology for selection of tool inserts. Measurement. Available online 7 September 2012

Julie Z. Zhang, Joseph C. Chen, E. Daniel Kirby. Surface roughness optimization in an end-milling operation using the Taguchi design method. Journal of Materials Processing Technology. Volume 184, Issues 1–3, 12 April 2007, Pages 233–239

PALMA, Ernani Sales. Metrologia. Belo Horizonte. 2006. Disponível em <<http://mea.pucminas.br/palma/metrolapostindice.pdf>> Acessado em 21 de agosto de 2012.

PANGRÁCIO, Mauro Luiz. Análise da qualidade de furos realizados por fresamento helicoidal interpolado. 2003. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Paraná, Programa de Pós Graduação em Engenharia Mecânica, Curitiba.

Pizzolato, Morgana. Tolerâncias – texto aula. 2009 Disponível em <http://w3.ufsm.br/engproducao/wp-content/uploads/tolgeom_texto_aula.pdf> Acessado em 21 de agosto de 2012.

PONTIFÍCIA UNIVERSIDADE CATÓLICA DE MINAS GERAIS. Pró-Reitoria de Graduação. Sistema de Bibliotecas. Padrão PUC Minas de normalização: normas da ABNT para apresentação de trabalhos científicos, teses, dissertações e monografias. Belo Horizonte, 2010. Disponível em: <<http://www.pucminas.br/biblioteca>>. Acesso em: 21 de Maio de 2012

S. Adamczak, D. Janecki, K. Stepień. Cylindricity measurement by the V-block method – Theoretical and practical problems. Measurement. Volume 44, Issue 1, January 2011, Pages 164–173

Site oficial da Cincinnati. Disponível em <http://www.cinmach.com/tech/tech_set.htm> Acesso em: 14 de Abril de 2012

Tapiea, K.B. Mawussia, B. Anselmetti. Circular tests for HSM machine tools: Bore machining application. **International Journal of Machine Tools & Manufacture** 47, August 2007, Pages 805–819.

Vocabulário Internacional de Termos Fundamentais e Gerais de Metrologia – VIM. Portaria Inmetro 029 de 1995.

Yongjin Kwon, Tzu-Liang (Bill) Tseng, Yalcin Ertekin. Characterization of closed-loop measurement accuracy in precision CNC milling. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing. Volume 22, Issue 4, August 2006, Pages 288–296.